



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

**“ANÁLISIS DE LLUVIAS  
DESENCADENANTES DE  
DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES  
EN EL PIRINEO CATALÁN”**

Autor:

**Vicente Espinosa Córdova**

Dirigido por:

**José Moya Sánchez**

Máster en:

**Ingeniería del Terreno**

Barcelona, **14 de junio de 2019**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

### **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres y a mis hermanos por apoyarme y alentarme incondicionalmente en todas las decisiones tomadas durante todo este tiempo y por permitir que toda esta experiencia fuera posible.

Quiero agradecer a mi tutor José Moya, por el tiempo y dedicación brindada, y por ser quien guio mi camino durante la realización de este trabajo.

## Resumen

Los flujos torrenciales son movimientos de masa formados por una mezcla de suelo y agua que se mueven rápidamente, con un elevado poder destructivo. Dependiendo de la concentración relativa de sedimento y agua se distinguen en corrientes de derrubios (alta concentración de sedimentos) y flujos hiperconcentrados (menor concentración de sedimentos). La lluvia es el principal factor que desencadena este tipo de movimientos debido al aumento en el contenido de agua del suelo, lo que implica un cambio en la presión de poros y disminución de la succión. Dado el alto poder destructivo de estos flujos se han investigado varios mecanismos de prevención, siendo los sistemas de alerta temprana basados en umbrales de lluvia el método más usado.

Este trabajo se centra en el análisis de lluvias desencadenantes de flujos torrenciales en el Barranco del Rebaixader, una cuenca de primer orden ubicada cerca de la población de Senet, en los Pirineos Catalanes. En el año 2009 se instaló en el barranco un sistema de auscultación para detectar la formación de flujos torrenciales y para monitorizar las condiciones ambientales, por lo que se dispone de un registro detallado de la lluvia y de la ocurrencia de flujos torrenciales para un periodo de 10 años. El objetivo principal ha sido obtener el umbral de lluvia que mejor explique el desencadenamiento de flujos, y su comparación con umbrales existentes de la zona de estudio, con un umbral global y con un umbral de otra zona que dispone de un sistema de monitorización similar.

En el presente trabajo se definieron envolventes inferiores, usando dos métodos de cálculo de la intensidad – duración. Un aspecto esencial del análisis es la acotación del inicio y final de cada episodio de lluvia, para lo cual se usa un intervalo de tiempo fijo sin lluvia (periodo inter-eventos de lluvia,  $T_{rd}$ ). En este caso, el análisis se ha realizado considerando un rango de valores de  $T_{rd}$ , para cada valor se ha calculado un umbral y finalmente se ha elegido aquel umbral que minimiza el numero de lluvias que superan el umbral y que no desencadenan flujos.

El umbral que presentó una mejor capacidad predictiva y menor cantidad de falsas alarmas fue el definido mediante el método de la duración flotante, con un  $T_{rd}$  de 1 hora ( $I = 7,06 D^{-0,348}$ ). El análisis demostró la sensibilidad de los umbrales al método de cálculo empleado y a  $T_{rd}$ . Aún una vez obtenido un umbral optimizado, la cantidad de falsas alarmas es elevada. Esto indica que para que una lluvia desencadene un flujo torrencial, la superación del umbral es una condición

necesaria pero no suficiente. Este hecho sugirió, que también entran en juego otros factores como la topografía del terreno y disponibilidad de sedimento en el área fuente.

Para analizar la posible influencia de otros factores, finalmente se llevó a cabo un análisis de la cronología temporal de las lluvias que superan el umbral y de los flujos torrenciales. Este análisis permitió descubrir que existió un claro cambio en el comportamiento de las lluvias que superan el umbral en el verano del 2014, siendo mas frecuentes desde entonces. Este cambio de comportamiento coincide con la segunda corriente de derrubios mas importante ocurrida en el barranco desde el inicio de la auscultación. Dicha corriente formó un muro de grandes bloques al pie del área fuente, que actúa como una presa que retiene sedimentos y que dificulta la formación de nuevos flujos torrenciales.

## Abstract

Torrential flows are mass movements formed by a mixture of soil and water that move rapidly with a high destructive power. Depending on the relative concentration of sediment and water, they are distinguished by debris flows (high sediment concentration) and debris floods (lower sediment concentration). Rainfall is the main factor that trigger this type of movements due to the increase of the water content in the soil, which implies a change in the pore pressure and decrease of suction. Due to the high destructive power of these flows, several prevention mechanisms have been investigated, being the early warning systems, based on rainfall thresholds, the most used method.

This work focuses on the analysis of rainfall triggering torrential flows in the Rebaixader catchment, located near the town of Senet, in the Catalan Pyrenees. In 2009, an auscultation system was installed to detect the formation of torrential flows and to monitor the environmental conditions, for which a detailed record of the rain and the occurrence of torrential flows for a period of 10 years is available. The main objective has been to obtain the rainfall threshold that best explains the triggering of flows, and its comparison with existing thresholds of the study area, with a global threshold and with a threshold of another area that has similar monitoring system.

In this work, lower envelopes were defined, using two methods of calculating intensity – duration. An essential aspect of the analysis is the definition of the beginning and the end of each rainfall episode, for which a fixed time interval without rain is used (inter-event rainy period,  $T_{rd}$ ). In this case, the analysis was carried out considering a range of values of  $T_{rd}$ , for each value a threshold has been calculated, and finally a threshold that minimizes the number of rains that exceed the threshold and do not trigger flows has been chosen.

The threshold that had the best predictive capacity and a lower percentage of false alarms, was the one defined by the floating duration method, with a  $T_{rd}$  of 1 hour ( $I = 7,06 D^{-0,348}$ ). The analysis showed the sensitivity of the rainfall thresholds to calculation method used and to  $T_{rd}$ . Even once optimized threshold has been obtained, the amount of false alarms is high. This indicates that exceeding the threshold is a necessary but not enough condition for a rain to trigger a torrential flow. This fact suggested that other factors also come into play, such as the topography and availability of sediment in the source area.

In order to analyze the possible influence of other factors, an analysis of the temporal chronology of the rains that exceed the threshold and the torrential flows was carried out. This analysis allowed us to discover that there was a clear change in the behavior of rains that exceed the threshold in the summer of 2014, being more frequent since then. This change of behavior coincides with the second most important debris flow occurred since the start of auscultation, in which a wall of large blocks was formed on the foot of the source area acting as a dam that retain sediments and difficult the triggering of new torrential flows.

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>11</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
1.1.    PLANTEAMIENTO .....	12
1.2.    OBJETIVOS .....	13
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>14</b>
2.1.    DEFINICIÓN DE PARÁMETROS .....	14
2.1.1.    Corrientes de derrubios .....	14
2.1.2.    Flujos hiperconcentrados .....	16
2.2.    ZONA DE ESTUDIO .....	16
2.3.    SISTEMA DE MONITORIZACIÓN .....	18
2.4.    UMBRALES DE LLUVIA .....	20
2.4.1.    Modelos físicos .....	21
2.4.2.    Modelos empíricos.....	21
2.4.3.    Umbrales de lluvia existentes .....	22
2.4.3.1.    Método de la duración total – intensidad media .....	22
2.4.3.2.    Método de la duración flotante - intensidad flotante máxima .....	23
<b>3. ANÁLISIS DE UMBRALES EXISTENTES. ....</b>	<b>25</b>
3.1.    ROC ANÁLISIS .....	25
3.1.1.    Método de la duración total (D <sub>tot</sub> ).....	26
3.1.2.    Método de la duración flotante (D <sub>fl</sub> ) .....	28
3.2.    ANÁLISIS CRONOLÓGICO DE LLUVIAS .....	29
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>32</b>
4.1.    ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	32
4.2.    DEFINICIÓN DE UMBRALES DE LLUVIA .....	34
4.2.1.    Método de la duración total (D <sub>tot</sub> ).....	34
4.2.2.    Método de la duración flotante (D <sub>fl</sub> ). ....	35

<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LLUVIAS QUE DESENCADENAN EVENTOS .....	38
5.2. PROPUESTA DE UMBRALES DE LLUVIA .....	41
5.2.1. ROC análisis de umbrales de lluvia propuestos.....	46
5.2.1.1. Método de la duración total (D <sub>tot</sub> ).....	46
5.2.1.2. Método de la duración flotante (D <sub>fl</sub> ). ....	47
5.3. ANÁLISIS DE LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL.....	48
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>65</b>



## Índice de figuras

FIGURA 1. GRANULOMETRÍA DE UNA CORRIENTE DE DERRUBIOS. (GARCÍA GONZÁLEZ, 2004).....	15
FIGURA 2. RECORRIDO DE FLUJOS TORRENCIALES POR EL BARRANCO REBAIXADER. (M. HÜRLIMANN, ABANCÓ, MOYA, & VILAJOSANA, 2014) .....	17
FIGURA 3. CUADRO RESUMEN DE LAS ESTACIONES EN EL BARRANCO REBAIXADER. (M. HÜRLIMANN ET AL., 2014)..	19
FIGURA 4. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITORIZACIÓN. (M. HÜRLIMANN ET AL., 2014). .....	20
FIGURA 5. UMBRAL DE LLUVIA DEFINIDO POR EL MÉTODO DTOT. (MARCEL HÜRLIMANN ET AL., 2019). .....	23
FIGURA 6. UMBRALES DE LLUVIA PARA DIFERENTES PERCENTILES, USANDO EL MÉTODO DFL. (CLÀUDIA ABANCÓ ET AL., 2016) .....	24
FIGURA 7. MATRIZ DE CONFUSIÓN. FUENTE: (FAWCETT, 2005). .....	26
FIGURA 8. CURVA ROC QUE MUESTRA CLASIFICADORES DISCRETOS. FUENTE: (FAWCETT, 2005). .....	26
FIGURA 9. CURVA ROC DEL UMBRAL USANDO EL MÉTODO DTOT.....	27
FIGURA 10. CURVA ROC DEL UMBRAL USANDO EL MÉTODO DFL .....	28
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN CRONOLÓGICA DE LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL. MÉTODO DTOT. A) TODAS LAS LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL. B) LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL Y DESENCADENAN EVENTOS. C) LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL Y NO DESENCADENAN EVENTOS. ....	30
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN CRONOLÓGICA DE LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL. MÉTODO DFL. A) TODAS LAS LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL. B) LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL Y DESENCADENAN EVENTOS. C) LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL Y NO DESENCADENAN EVENTOS. ....	31
FIGURA 13. UMBRAL POR EL MÉTODO DTOT CON T <sub>RD</sub> DE 4H. ....	35
FIGURA 14. REPRESENTACIÓN DE EPISODIOS DE LLUVIA Y UMBRAL PRELIMINAR, MÉTODO D <sub>FL</sub> .....	36
FIGURA 15. INTENSIDADES CON LA MÁXIMA DIFERENCIA INTENSIDAD DE LLUVIA-UMBRALES PRELIMINAR.....	36
FIGURA 16. UMBRAL DEFINITIVO OBTENIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL. ....	37
FIGURA 17. CARACTERIZACIÓN DE LLUVIAS QUE DESENCADENAN EVENTOS (LLUVIA VS DURACIÓN). ....	38
FIGURA 18. CARACTERIZACIÓN DE LLUVIAS QUE DESENCADENAN EVENTOS (I <sub>AV</sub> VS VOLUMEN).....	39
FIGURA 19. VARIABILIDAD DE LA LLUVIA SEGÚN VARIA T <sub>RD</sub> . A) MÉTODO DTOT. B) MÉTODO DFL, .....	40
FIGURA 20. FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE EVENTOS. ....	41
FIGURA 21. COMPARACIÓN DE UMBRALES PARA EL BARRANCO REBAIXADER, MÉTODO DTOT, T <sub>RD</sub> =1H. ....	43
FIGURA 22. COMPARACIÓN DEL UMBRAL PROPUESTO VERSUS UMBRALES EXISTENTES USANDO EL MÉTODO DTOT. ....	44
FIGURA 23. COMPARACIÓN DE UMBRALES DEFINIDOS PARA EL BARRANCO REBAIXADER POR EL MÉTODO DFL. ....	45
FIGURA 24. CURVA ROC PARA EL UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DTOT Y T <sub>RD</sub> DE 1 HORA .....	47
FIGURA 25. CURVA ROC PARA EL UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL Y T <sub>RD</sub> DE 1 HORA .....	48
FIGURA 26. MURO DE BLOQUES FORMADO POR EL DEBRIS FLOW DEL 13 DE AGOSTO DE 2014 .....	49
FIGURA 27. DISTRIBUCIÓN CRONOLÓGICA DE LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL. MÉTODO DTOT. A) TODAS LAS LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL. B) SOLO LLUVIAS QUE DESENCADENAN EVENTOS. C) SOLO LLUVIAS QUE NO DESENCADENAN EVENTOS. ....	50

FIGURA 28. DISTRIBUCIÓN CRONOLÓGICA DE LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL. MÉTODO DFL. A) TODAS LAS LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL. B) SOLO LLUVIAS QUE DESENCADENAN EVENTOS. C) SOLO LLUVIAS QUE NO DESENCADENAN EVENTOS. ....	51
FIGURA 29. MAGNITUD LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL VS PERIODO DE RETORNO. MÉTODO DTOT. A) LLUVIAS PREVIAS AL 13/08/2014. B) LLUVIAS POSTERIORES AL 13/08/2014.....	53
FIGURA 30. MAGNITUD LLUVIAS QUE SUPERAN EL UMBRAL VS PERIODO DE RETORNO. MÉTODO DFL. A) LLUVIAS PREVIAS AL 13/08/2014. B) LLUVIAS POSTERIORES AL 13/08/2014.....	54
FIGURA 31. VOLUMEN MOVILIZADO VS PERIODO DE RETORNO. ....	55
FIGURA 32. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DTOT, T <sub>RD</sub> =2 HORAS.....	65
FIGURA 33. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL, T <sub>RD</sub> =2 HORAS. ....	65
FIGURA 34. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DTOT, T <sub>RD</sub> =3 HORAS.....	66
FIGURA 35. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL, T <sub>RD</sub> =3 HORAS. ....	66
FIGURA 36. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DTOT, T <sub>RD</sub> =4 HORAS.....	67
FIGURA 37. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL, T <sub>RD</sub> =4 HORAS. ....	67
FIGURA 38. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DTOT, T <sub>RD</sub> =5 HORAS.....	68
FIGURA 39. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL, T <sub>RD</sub> =5 HORAS. ....	68
FIGURA 40. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DTOT, T <sub>RD</sub> = 6 HORAS.....	69
FIGURA 41. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL, T <sub>RD</sub> = 6 HORAS. ....	69
FIGURA 42. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DTOT, T <sub>RD</sub> = 12 HORAS.....	70
FIGURA 43. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL, T <sub>RD</sub> = 12 HORAS. ....	70
FIGURA 44. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DTOT, T <sub>RD</sub> = 24 HORAS.....	71
FIGURA 45. UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL, T <sub>RD</sub> = 24 HORAS. ....	71

## Índice de tablas

TABLA 1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS. ....	14
TABLA 2. MATRIZ DE CONFUSIÓN DEL UMBRAL USANDO EL MÉTODO DTOT.....	27
TABLA 3. MATRIZ DE CONFUSIÓN DEL UMBRAL USANDO EL MÉTODO DFL.....	28
TABLA 4. RESUMEN DE LLUVIAS QUE DESENCADENAN EVENTOS. ....	33
TABLA 5. CANTIDAD DE LLUVIAS QUE NO DESENCADENAN EVENTOS PARA LOS DIFERENTES T_RD. ....	34
TABLA 6. VARIABILIDAD DE LA LLUVIA SEGÚN VARÍA T_RD. ....	40
TABLA 7. RESUMEN DE RESULTADOS USANDO EL MÉTODO DTOT.....	42
TABLA 8. RESUMEN DE RESULTADOS USANDO EL MÉTODO DFL. ....	42
TABLA 9. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EL UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DTOT Y T_RD DE 1 HORA.....	46
TABLA 10. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EL UMBRAL DEFINIDO MEDIANTE EL MÉTODO DFL Y T_RD DE 1 HORA .....	47

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento

Los deslizamientos son fenómenos naturales que pueden causar desastres de gran magnitud, ya sea en el medio ambiente, flora y/o fauna, o en la sociedad, poblaciones y/o infraestructura. Entre los deslizamientos más comunes y peligrosos están las corrientes de derrubios, que son una mezcla densa de suelo y agua que se desplaza a grandes velocidades y van incorporando a su mezcla, material granular suelto (C Abancó, Paretas-Martínez, Falgàs, Pérez-Arcas, & Hürlimann, 2015). Estos fenómenos, así como también los flujos hiperconcentrados son comunes en zonas montañosas con ambientes tropicales y suelen estar ligados a un aumento en la presión de poros y/o disminución de la succión debido a cambios en el contenido de agua.

Este tipo de movimientos son tan peligrosos, ya que no se desconoce con exactitud cuál es el mecanismo de iniciación, y el comportamiento dinámico. Es por esto, que las técnicas y sistemas de monitorización juegan un papel fundamental en la mejora del entendimiento de este tipo de eventos y para obtener modelos fiables que permitan su correcta predicción y prevención.

La lluvia es el factor climático más importantes en el desencadenamiento de deslizamientos, debido a la infiltración de agua ya que, dependiendo de la capacidad de drenaje del suelo, la presión de poros puede aumentar muy rápidamente hasta llegar a un punto crítico, el cual supere la resistencia del suelo y, además el aumento en el contenido de agua en el suelo conlleva a una disminución de la succión. También se deben tener en cuenta características como la vegetación, resistencia del suelo, características geológicas, topográficas y condiciones climáticas de la zona en estudio. Debido a que estos factores pueden variar en grandes magnitudes de una zona a otra, no es posible implementar un sistema de alarmas a gran escala, sino más bien deben definirse sistemas de alarma a nivel local, con la ayuda de umbrales de lluvia.

Identificados estos riesgos se planteó inicialmente analizar las lluvias antecedentes y desencadenantes de flujos torrenciales de un registro de alta frecuencia de una serie temporal de 9 años, disponible para el Barranco del Rebaixader para determinar la frecuencia y ajustar una función de distribución de probabilidad de las lluvias que superan umbrales ya definidos para esta zona. Además de un análisis del efecto del cambio climático.

El análisis de la distribución cronológica de las lluvias permitió identificar que las lluvias que superaban el umbral y no desencadenaban flujos torrenciales se daban con una frecuencia elevada, lo cual dificultó el ajuste de una función de probabilidad y la vez planteó nuevas inquietudes sobre el correcto ajuste de los umbrales y de las condiciones usadas para definirlos.

Atendiendo estas inquietudes e intentando mejorar la predicción de flujos torrenciales se planteó calcular nuevos umbrales de lluvia usando los métodos de la duración total y duración flotante, variando el tiempo para definir la duración de la lluvia, sin ninguna restricción adicional para la selección de episodios de lluvia. Bajo este análisis se espera determinar la influencia de este tiempo entre episodios de lluvia y comprobar si aún existe el fenómeno identificado en un inicio.

## **1.2.Objetivos**

El presente trabajo tiene como objetivo analizar las lluvias desencadenantes de flujos torrenciales en el Barranco del Rebaixader. Zona la cual cuenta con umbrales de lluvia definidos mediante el método de la duración total y duración flotante.

Analizar y comparar los umbrales de lluvia existentes en la zona de estudio, mediante el uso de indicadores ROC

Calcular nuevos umbrales de lluvia usando los métodos de la duración total y duración flotante, variando el tiempo para definir la duración de la lluvia y así determinar el umbral que mejor se ajuste a las condiciones de la zona.

Estudiar la distribución cronología de las lluvias que superan los umbrales con el fin de determinar las frecuencias con la que se desencadenan los flujos torrenciales, y encontrar patrones que permitan un mejor entendimiento y predicción de estos eventos.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Definición de parámetros

Para una mejor interpretación y entendimiento del lector, se muestra un resumen (Tabla 1) de la definición de algunos parámetros usados con frecuencia en el desarrollo del presente trabajo.

*Tabla 1. Definición de parámetros.*

Abreviatura	Descripción
Evento	Episodio de lluvia que desencadena flujos torrenciales, incluye corriente de derrubios y flujos hiperconcentrados
No evento	Episodio de lluvia que no desencadena flujos torrenciales
T <sub>rd</sub>	Tiempo usado para definir la duración de la lluvia (horas)
Método Dt <sub>tot</sub>	Método que usa la intensidad media y duración total para definir umbrales de lluvia
Método D <sub>fl</sub>	Método que usa la intensidad flotante máxima y duración flotante para definir umbrales de lluvia
I <sub>av</sub>	Intensidad media (mm/h)
d <sub>tot</sub>	Duración total (horas)
I <sub>max</sub>	Intensidad flotante máxima (mm/h)
d <sub>fl</sub>	Duración flotante (horas)
I <sub>u</sub>	Intensidad del umbral (mm/h)

#### 2.1.1. Corrientes de derrubios

Las corrientes de derrubios o debris flows en inglés, son una mezcla densa de suelo y agua que se desplaza a grandes velocidades y va incorporando a su mezcla material granular suelto, se caracterizan por tener una elevada carga de solidos (C Abancó et al., 2015). Una de sus principales características es su comportamiento mecánico, presentan una resistencia al corte lo que hace posible que se detengan en terrenos con pendiente. En este tipo de movimientos interactúan fuerzas del sólido y del flujo, lo cual les proporciona una gran fuerza destructiva, pueden taponar drenajes,

destruir la vegetación, dañar estructuras y causar muertes. Las corrientes de derrubios son muy peligrosas debido a su fuerza, velocidad, volumen y a que pueden ocurrir sin ningún aviso, dificultando la evacuación de poblaciones aledañas.

La distribución granulométrica de las corrientes de derrubios suele ser bien graduada (Figura 1), es decir, muestra una amplia variedad de tamaños de grano que van desde el tamaño arcilla hasta bloques de orden métrico. La concentración de sólidos varía entre el 25 y 86% en volumen, y entre el 35 y 90% en peso. El contenido de agua ronda entre el 10 y 30% en peso. Los tamaños tipo arcilla generalmente no superan el 5%, mientras que los tamaños tipo limo rodean entre el 10 y 15%. (García González, 2004).

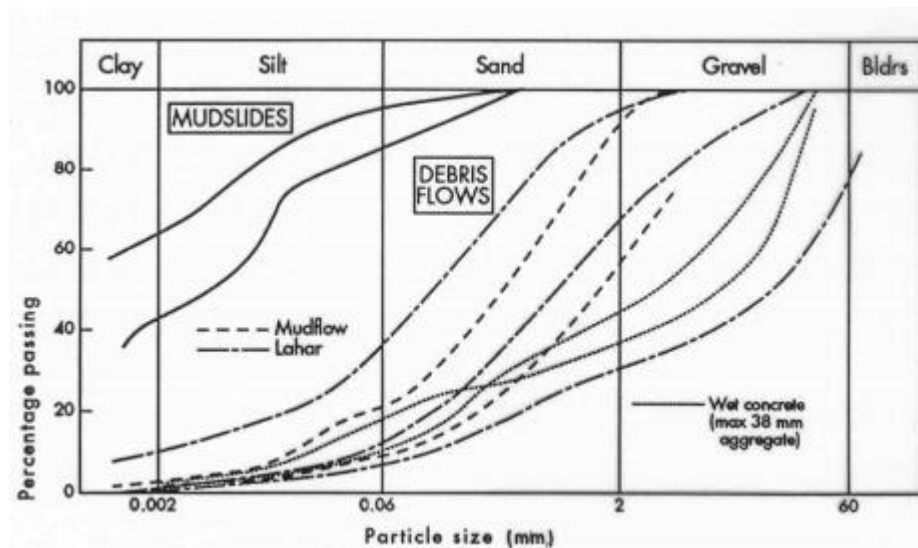


Figura 1. Granulometría de una corriente de derrubios. (García González, 2004).

García Gonzales (2004) menciona que los materiales más favorables para la formación de corrientes de derrubios son los depósitos coluviales, depósitos fluviales, glaciares o volcánicos y suelos meteorizados. El desencadenante más frecuente se debe al aumento de la presión de poros debido a un aumento rápido del contenido de agua, que se puede dar por lluvias intensas y/o deshielo. Las precipitaciones de larga duración y moderada intensidad también pueden causar corrientes de derrubios, pero en menor proporción.

### **2.1.2. Flujos hiperconcentrados**

El término flujos hiperconcentrados o debris floods en inglés, se aplica para flujos intermedios entre corrientes de derrubios y coladas de tierra, y se los define como un flujo creciente de agua, cargado con una gran cantidad de escombros en un canal escarpado. T. Pierson (1970) los caracteriza como flujos en los cuales una gran cantidad de arena en completa suspensión dinámica es transportada una vez se ha alcanzado un mínimo de fino (limos y arcillas); Beverage and Culbertson (1964) definieron que para que un flujo sea considerado como flujo hiperconcentrado debe tener una concentración de sedimentos mínima del 20% en volumen o 40 % en peso, y máxima de 60% en volumen u 80 % en peso.

Los flujos hiperconcentrados se pueden iniciar cuando existen grandes flujos de agua y estos van agregando sedimentos en suspensión debido al arrastre y erosión o cuando una corriente de derrubios pierde material grueso por dilución y/o deposición de material. En este tipo de flujo no se tiene un comportamiento Newtoniano, no existe interacción de las fuerzas de las partículas sólidas con las de flujo y su resistencia al corte presenta un comportamiento plástico, que depende de la viscosidad del flujo.

Los flujos hiperconcentrados generalmente no son tan peligrosos como las corrientes de derrubios pues sus velocidades son menores y no transportan grandes bloques, sin embargo, presentan un gran riesgo a poblaciones cercanas a ríos debido a su potencial para ocasionar taponamientos e inundaciones, así como también erosionar cimentaciones de puentes u otras estructuras expuestas. (Pierson, Jakob, & Hungr, 1970).

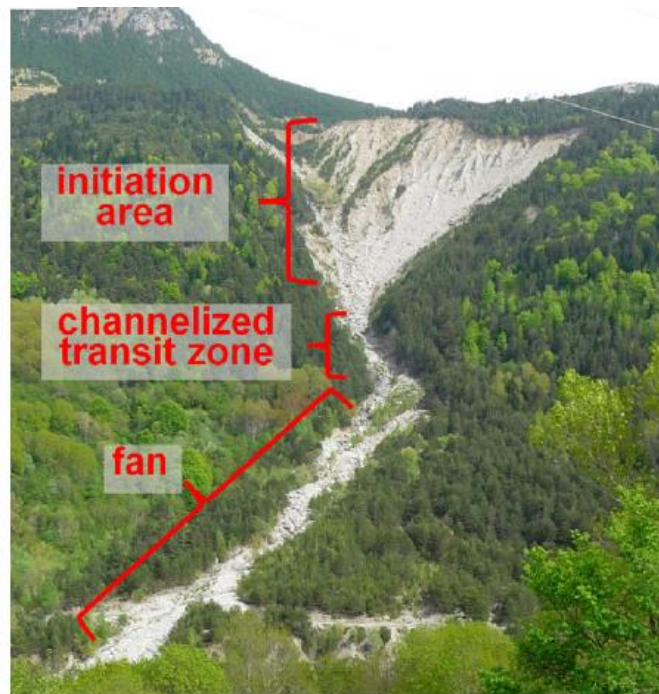
## **2.2. Zona de estudio**

El Barranco del Rebaixader se encuentra en una cuenca aproximadamente a 2 km de la población Senet, provincia de Lleida, en los Pirineos Centrales. Tiene un área de drenaje de unos 0.53 km<sup>2</sup> con altitudes que varían entre 1350 msnm en el ápice del abanico de deposición del material, hasta 2475 msnm en el pico más alto. El sustrato rocoso está formado básicamente por pizarras y filitas de formación paleozoica, mientras que las formaciones superficiales están formadas por una capa gruesa de till glacial y postglacial, se trata de un conjunto de sedimentos sin ningún tipo de clasificación constituidos por clastos heterogéneos en una matriz lutítica (limos o arcillas) y/o arenosa. Este tipo de formaciones se caracterizan por no estar consolidadas y ser



susceptibles a lluvias intensas y de corta duración, pues las lluvias de larga duración e intensidad moderada el suelo es capaz de drenar el agua infiltrada sin desencadenar flujos torrenciales (Batlle Carrerras, 2011).

El recorrido de los flujos torrenciales inicia en la zona escarpada y con poca vegetación, luego ingresan a una zona de transición acanalada con pendiente de unos  $21^\circ$  y un recorrido de 150m aproximadamente, para finalmente desembocar en una zona de acumulación o cono de deyección sin confinamiento lateral con una pendiente promedio de  $18^\circ$  como se observa en la Figura 2 (Marcel Hürlimann, Oorthuis, Abancó, Carleo, & Moya, 2019).



*Figura 2. Recorrido de flujos torrenciales por el Barranco Rebaixader. (M. Hürlimann, Abancó, Moya, & Vilajosana, 2014)*

Las condiciones climáticas en la zona se ven afectadas por tres factores principales: los vientos del oeste del Atlántico Norte, la proximidad al Mar Mediterráneo y los efectos orográficos de la cordillera Pirenaica, condensación que experimenta la masa de aire húmedo durante el ascenso por enfriamiento que provocan lluvias de corta duración, y generalmente se concentran en los meses de verano. En los pirineos las lluvias desencadenantes pueden ser de corta o de larga duración

dependiendo de la estación, las primeras se dan generalmente en verano y registran altas intensidades mientras que las segundas se presentan durante el otoño con moderadas intensidades (Marcel Hürlimann et al., 2019).

M. Hürlimann et al. (2014) menciona que existen varias razones por las cuales se seleccionó el Barranco Rebaixader para monitorizar corrientes de derrubios, entre las más importantes están:

- a. Fácil acceso al Barranco.
- b. Gran cantidad de corrientes de derrubios.
- c. La distancia entre la zona de iniciación, tránsito y zona de acumulación es corta, aproximadamente 1km.
- d. Las medidas de control del torrente no afectan el comportamiento de los corrientes de derrubios.

### **2.3.Sistema de monitorización**

La monitorización en el Barranco Rebaixader comenzó en el verano del 2009 y con el paso de los años se ha ido mejorando e implementando nuevas estaciones, sensores y métodos de recolección de información. El sistema de monitorización cuenta con un total de seis estaciones: dos estaciones meteorológicas (METEO-CHA y METEO-TOP), dos estaciones para recoger datos de infiltración (INF-TOP y INF-SCARP) y dos estaciones que se centran en la detección de corrientes de derrubios y su comportamiento (FLOW-WR y FLOW-SPI). En una primera fase fueron instalados una red cableada de sensores que incluía geófonos, dispositivos ultrasónicos y una estación meteorológica, en el 2011 se complementó esta red y se instaló una cámara de video, mientras que durante el 2012 se instaló una red inalámbrica relacionada a la iniciación del mecanismo (M. Hürlimann et al., 2014). En la Figura 3 se muestra un resumen de las estaciones con los diferentes tipos de sensores que tiene cada una de ellas.

El pluviómetro principal METEO-CHA, está instalado en la parte inferior de la cuenca, tiene una resolución de 0.2mm y toma datos cada 5 minutos, mientras que la estación METEO-TOP fue instalada temporalmente por encima del eskarpe. Las estaciones INF-TOP y INF-SCARP, fueron instaladas para analizar el agua subterránea, la presión de poros y temperatura del suelo, la primera ubicada en la morrena lateral y la segunda ubicada en el eskarpe, en un área de baja actividad. Las

dos estaciones cuentan con tres sensores de humedad del suelo y dos sensores para medir la succión y la temperatura del suelo. Al igual que las estaciones meteorológicas, las estaciones de infiltración toman datos cada 5 minutos (M. Hürlimann et al., 2014).

Las estaciones para la detección de corrientes de derrubios consisten de tres dispositivos, geófonos para la detección de vibraciones, un dispositivo ultrasónico para registrar la altura del flujo y una cámara de video, están ubicados en el canal de transición y/o en la parte superior del abanico (M. Hürlimann et al., 2014). Una vista detallada de la ubicación de las estaciones se puede observar en la Figura 4.

	Abbreviation of station	Wired–wireless <sup>a</sup>	Sensors (number of sensors installed)	Model	Installation year
Initiation	METEO-CHA	wr	Rain gauge (1)	RM YOUNG 52203	2009
			Air temperature sensor (1)	Campbell Scientific CS215	2009
			Relative air humidity sensor (1)		2012
	METEO-TOP	wl	Rain gauge (1)	Decagon ECRN-100	2012
			Air temperature sensor (1)	Decagon PASSECT	2012
			Snow height sensor (1)	Campbell Scientific SR50A/AT	2012
	INF-TOP and INF-SCARP	wl	Soil moisture sensor (3 and 3)	Decagon 10HS	2012
			Water potential sensor (2 and 2)	Decagon MPS-2	2012
			Soil temperature sensor (2 and 2)		
Flow dynamics	FLOW-WR	wr	Geophones (5)	Geospace 20 DX	2009
			Ultrasonic device (1)	Pepperl+Fuchs UC6000-30GM-IUR2-V15	2009
			Video camera (1)	Mobotix MX-M12D-Sec-DNight-D43N43	2011
	FLOW-SPI	wr			
			Geophones (3)	Geospace 20 DX	2012

<sup>a</sup> wr for wired network and wl for wireless network

Figura 3. Cuadro resumen de las estaciones en el Barranco Rebaixader. (M. Hürlimann et al., 2014).

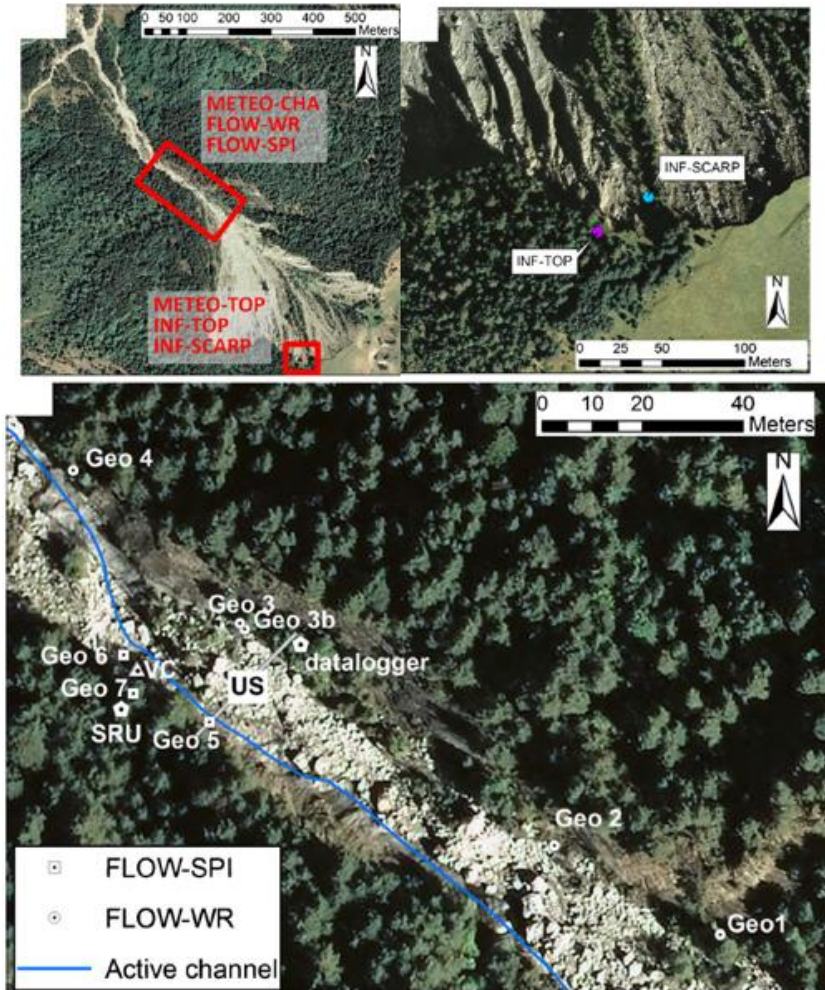


Figura 4 Ubicación de las estaciones de monitorización.(M. Hürlimann et al., 2014).

## 2.4.Umbrales de lluvia

Un umbral es un nivel, mínimo o máximo, que de ser alcanzado o superado tendrá lugar un determinado proceso o un cambio de estado. Un umbral mínimo representa el nivel por debajo del cual no ocurrirá un determinado evento, mientras que un umbral máximo define un límite por encima del cual siempre ocurrirá un evento. Un umbral de lluvia define la cantidad de lluvia, humedad del suelo o condiciones hidrológicas que de ser alcanzado o superado desencadenará un deslizamiento, estos umbrales pueden ser definidos según modelos físicos (conceptuales) o empíricos (estadísticos). (Guzzetti, Peruccacci, Rossi, & Stark, 2007).

#### **2.4.1. Modelos físicos**

Los modelos físicos pretenden incorporar factores como el historial de lluvia a modelos de estabilidad de taludes incorporando modelos de infiltración. Este tipo de modelos pueden determinar la cantidad de precipitación necesaria para desencadenar un deslizamiento, lugar y hora en la que ocurrirá un deslizamiento. Pero tienen muchas limitaciones pues necesitan información espacial detallada de la morfología, litología, hidrología y características del suelo que controlan el desencadenamiento, recolectar de manera precisa esta gran cantidad de información en áreas de gran magnitud es una tarea difícil y costosa, este tipo de modelos se calibra usando registros de lluvia, lugar y hora en la que se han desencadenado deslizamientos. Umbrales basados en modelos físicos tienen un buen desempeño prediciendo deslizamientos superficiales (corrientes de derrubios).

#### **2.4.2. Modelos empíricos**

Los modelos empíricos solo tienen en cuenta eventos de lluvias que ha originado deslizamientos, estos tipos de umbrales suelen ser obtenidos definiendo una envolvente inferior, comúnmente trazada de forma visual sin ningún criterio matemático, estadístico o físico, intentando separar las lluvias que ocasionan de las que no ocasionan deslizamientos, de manera que se obtengan la menor cantidad de falsas alarmas posible.

Según el análisis espacial se pueden obtener umbrales globales, regionales y locales. Los umbrales globales establecen una envolvente inferior “universal” por debajo de la cual no ocurren deslizamientos. Umbrales regionales se definen para áreas con una extensión de algunos miles de kilómetros cuadrados que tengan similares características climáticas y fisiográficas. Umbrales locales consideran características climáticas y geomorfológicas en áreas que van desde unos pocos hasta varios cientos de kilómetros cuadrados. Umbrales regionales y locales tienen un buen desempeño en las zonas para las cuales fueron calculadas pero no se pueden usar para zonas vecinas debido a la gran variabilidad de los factores que intervienen (Guzzetti et al., 2007).



### 2.4.3. Umbrales de lluvia existentes

#### 2.4.3.1. Método de la duración total – intensidad media

Este tipo de método es el más común en el estudio de peligrosidad de deslizamientos, porque pueden ser usados cuando no se tiene un registro de lluvias de alta intensidad. En este método cada episodio de lluvia se representa como un punto en un gráfico  $I_{av} - D_{tot}$  y se busca una curva que mejor se ajuste a la predicción de eventos, generalmente este tipo de curvas siguen una ley potencial del tipo  $I = \alpha D^{-\beta}$ , en donde  $I$  es la intensidad en mm/h,  $D$  la duración en horas,  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes, se debe tener en cuenta que este tipo de correlaciones no tienen en cuenta características del terreno ni otras condiciones climáticas de la zona de estudio. A partir de esta primera curva se trazan paralelas con la misma pendiente  $\beta$ , para obtener umbrales con diferentes niveles de probabilidad, por ejemplo, el 100% equivale a que todos los eventos estén sobre el umbral, es decir un límite inferior, aumentando la cantidad de falsas alarmas.

M. Hürlimann et al. (2019) propusieron un umbral tomando en cuenta un registro de lluvia desde el 2009 hasta el 2018, durante el cual se registraron un total de 11 corrientes de derrubios y 24 flujos hiperconcentrados. Definieron la duración de cada episodio de lluvia bajo la condición de que no exista registro de precipitación una hora antes ni una hora después de cada episodio de lluvia, además seleccionaron los episodios de lluvia bajo la condición de que la lluvia diaria sea mayor a 10 mm. Bajo estas condiciones obtuvieron 446 episodios de lluvia que no desencadenaron ningún evento de flujo torrencial.

Definieron el umbral (Figura 5), ajustando una ley potencial con los datos de los 11 corrientes de derrubios, luego redujeron el coeficiente  $\alpha$ , manteniendo constante la pendiente  $\beta$  hasta que todas las corrientes de derrubios estén por encima del umbral, cuya ecuación final se muestra en la expresión (1). A pesar de que no se tuvieron en cuenta los 24 flujos hiperconcentrados para definir el umbral, solo cuatro no fueron correctamente clasificados, de los cuales algunos no movilizaron grandes volúmenes de material (Marcel Hürlimann et al., 2019).

$$I = 11D^{-0.74} \quad (1)$$

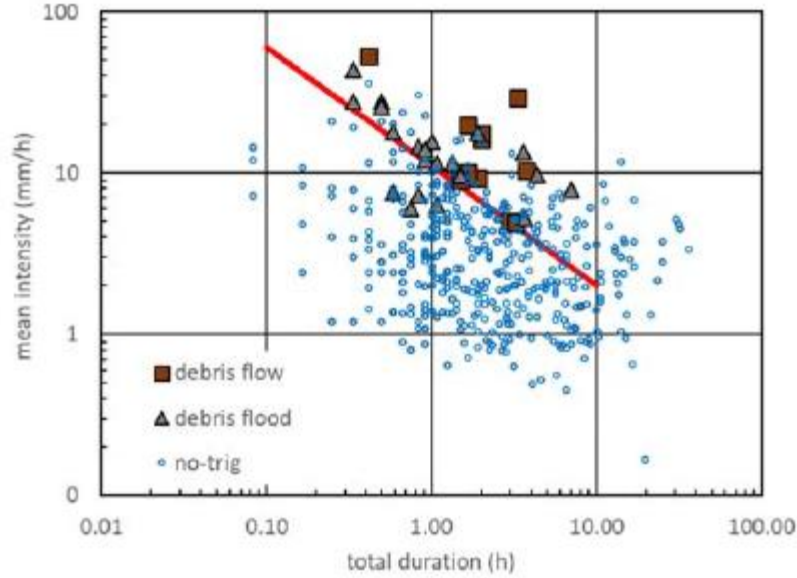


Figura 5 Umbral de lluvia definido por el método Dtot. (Marcel Hürlimann et al., 2019).

#### 2.4.3.2. Método de la duración flotante - intensidad flotante máxima

En este segundo método propuesto por C. Abancó et al. (2016), se tiene en cuenta la intensidad máxima flotante y la duración flotante. Usaron un registro de lluvia de seis años, desde el 2009 hasta el 2014 y al igual que en método anterior se usaron las mismas condiciones para la definición de la duración de lluvia y selección de los episodios de lluvia, obtuvieron 167 episodios de lluvia que no desencadenaron eventos de flujo torrencial, dentro de los cuales 25 dieron lugar a eventos.

En este método a diferencia del anterior, cada episodio de lluvia se representa como múltiples puntos en un gráfico Intensidad-Duración (I-D), cada uno de estos puntos definidos como la máxima intensidad de cada duración flotante, luego se ajusta una curva con una ley potencial similar al método anterior. De igual manera, se calculan varios umbrales para diferentes niveles de probabilidad como lo muestra la Figura 6, y se escoge el más conveniente.

Debido a que los umbrales obtenidos por este método no son líneas rectas y para comparar los dos métodos, se ajustó una ley potencial de manera que el 90% de eventos queden por encima del umbral, definido por la Ecuación (2) (Clàudia Abancó, Hürlimann, Moya, & Berenguer, 2016).

$$I = 5.49 * D^{-0.75} \quad (2)$$

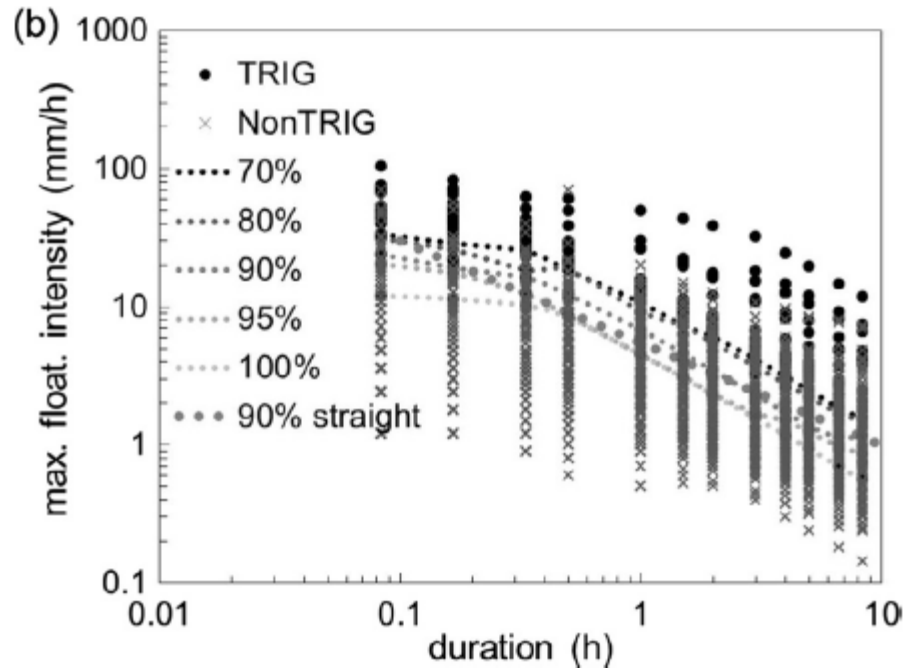


Figura 6 Umbrales de lluvia para diferentes percentiles, usando el Método Dfl. (Clàudia Abancó et al., 2016)

Los umbrales de lluvia obtenidos por los dos métodos presentan diferentes características, los umbrales obtenidos mediante el Método Dfl presentan pendientes más elevadas, esto quiere decir los episodios de lluvia que generan deslizamientos tienen intensidades más altas en periodos cortos, mientras que episodios con grandes cantidades de lluvia, pero con poca intensidad requieren una larga duración para desencadenar flujos torrenciales. Los umbrales fueron calculados bajo diferentes condiciones pues en el umbral  $D_{tot}$  se ajusta una envolvente de modo que todas las corrientes de derrubios queden sobre esta envolvente, mientras que en el método Dfl no se hace distinción entre tipo de flujos para la definición del umbral, dejando por debajo un evento de corriente de derrubios.

En umbrales que usan intensidad media, al estar representados mediante un único punto no dan información acerca de la variabilidad de la intensidad que tiene una lluvia, lo cual es una desventaja de cara a la implementación de un sistema de alarma, pues se debe esperar a que termine la lluvia para procesar y analizar los datos.



### 3. ANÁLISIS DE UMBRALES EXISTENTES.

En este capítulo se realizará un análisis de las bondades de los umbrales existentes en la zona mediante un análisis ROC, el cual refleja información importante del umbral como lo es: la exactitud o aciertos del umbral, porcentaje de falsas alarmas y área bajo la curva, este último parámetro da una idea general de la capacidad del umbral para predecir la ocurrencia de flujos torrenciales. Además, se realizará un análisis de cómo están distribuidas cronológica las lluvias que superan el umbral, desencadenen o no eventos, con la finalidad de identificar un patrón que permita predecir de mejor manera la ocurrencia de eventos.

#### 3.1. ROC análisis

El análisis de las características de un receptor o ROC por sus siglas en inglés es una técnica para visualizar, organizar y seleccionar clasificadores según su desempeño, las curvas ROC son un conceptualmente simples, pero suelen presentar algunas complejidades no obvias. Estas graficas se construyen en un plano bidimensional, cuyo eje “x” representan la razón de falsos positivos (fpr) o razón de falsas alarmas, y en el eje “y” la razón de verdaderos positivos (tpr), estos parámetros están definidos por las expresiones (3) y (4).

$$tpr \approx \frac{\text{Verdaderos positivos}}{\text{Total de positivos}} = \frac{TP}{TP+FN} = \frac{TP}{P} \quad (3)$$

$$fpr \approx \frac{\text{Falsos positivos}}{\text{Total de negativos}} = \frac{FP}{FP+TN} = \frac{FP}{N} \quad (4)$$

Para realizar un análisis ROC primero se debe clasificar cada episodio de lluvia relacionando la ocurrencia o no de evento con la predicción correspondiente del umbral, de esta comparación se obtienen cuatro tipos de categorías: verdadero positivo, falso negativo, verdadero negativo o falso positivo. Luego se obtiene la sumatoria de cada una de las cuatro categorías y se construye una matriz, llamada matriz de confusión como la indicada en la Figura 7. Los números en la diagonal principal representan los aciertos del umbral, mientras que los de la diagonal secundaria representan los errores.

Fawcett (2005) menciona que en las curvas ROC dependiendo de donde están situados los puntos, unos son mejores que otros, por ejemplo, en la Figura 8 el punto D representa una clasificación perfecta, pues tiene un 100% de aciertos y 0% de errores. Los clasificadores que dan

resultados del lado superior izquierdo, cerca del eje “x”, son considerados como conservadores, dan clasificaciones positivas solo con pruebas sólidas, por lo que presentan pocos falsos positivos, pero también tienen bajas tasas de verdaderos positivos. Clasificadores en la parte superior derecha son llamados liberales, aciertan la mayoría de los positivos, pero también suelen tener una tasa alta de falsos positivos. Los puntos en la diagonal representan clasificadores de probabilidad aleatoria, umbrales de este tipo no aportan ninguna información relevante.

		<u>True class</u>	
		<b>p</b>	<b>n</b>
<u>Hypothesized class</u>	<b>Y</b>	True Positives	False Positives
	<b>N</b>	False Negatives	True Negatives
Column totals:		<b>P</b>	<b>N</b>

Figura 7. Matriz de confusión. Fuente: (Fawcett, 2005).

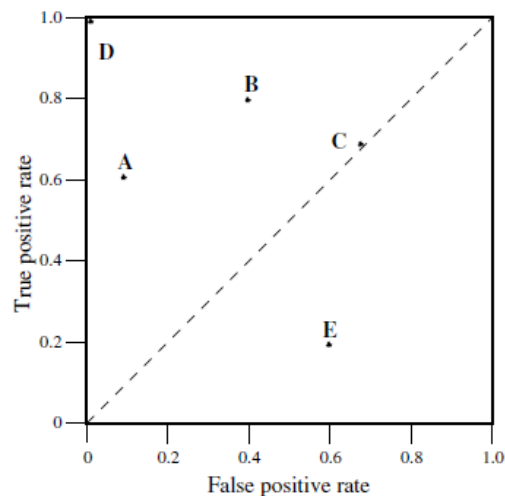


Figura 8. Curva ROC que muestra clasificadores discretos. Fuente: (Fawcett, 2005).

### 3.1.1. Método de la duración total (Dt<sub>tot</sub>)

Para analizar la capacidad de predicción del umbral primero se adoptó la siguiente hipótesis: una instancia es positiva cuando ha producido un evento, luego se clasificó cada uno de los episodios de lluvia mediante la comparación: si la instancia es positiva y la predicción del umbral

la clasifica como positiva es un verdadero positivo (TP) pero si la clasifica como negativa es un falso negativo (FN); si la instancia es negativa y el umbral la clasifica como positiva es un falso positivo (FP) pero si la clasifica como negativa es un verdadero negativo (TN). Se obtiene el total de cada una de las categorial y se construye la matriz de confusión (Tabla 2), con la ayuda de un algoritmo descrito en Fawcett (2015) se obtuvo la curva ROC mostrada en la Figura 9.

Tabla 2. Matriz de confusión del umbral usando el Método Dtot.

		Evento	
		p	n
Predicción umbral	Y	<b>29</b>	<b>94</b>
	N	<b>4</b>	<b>352</b>
		<b>33</b>	<b>446</b>
		P	N

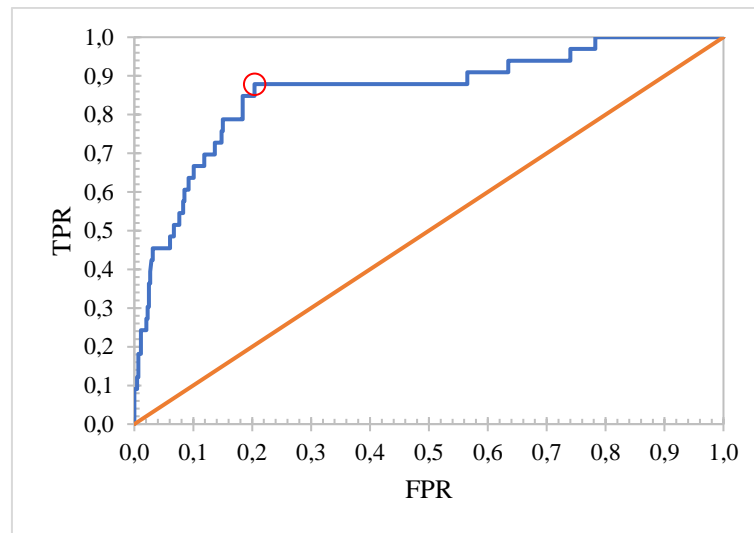


Figura 9. Curva ROC del umbral usando el Método Dtot.

Analizando la curva ROC y los parámetros que se obtiene de la matriz de confusión se obtuvo que el área bajo la curva es de 86% aproximadamente, la exactitud o aciertos presenta un valor bastante alto, cerca del 80%, el indicador ROC marcado en rojo se encuentra cerca de la esquina

superior izquierda, la cual equivale a una clasificación perfecta y el valor de falsas alarmas fue del 21%, por lo que se puede deducir que en general el umbral tiene buena capacidad de predicción y una confiabilidad relativamente alta para ser usado en un sistema de alarma.

### 3.1.2. Método de la duración flotante (Dfl)

Tomando la misma hipótesis y procedimiento que en el caso anterior se obtuvo la matriz de confusión (Tabla 3) y curva ROC (Figura 10) mostradas a continuación.

Tabla 3. Matriz de confusión del umbral usando el Método Dfl

		Evento	
		p	n
Predicción umbral	Y	<b>24</b>	<b>79</b>
	N	<b>2</b>	<b>63</b>
		<b>26</b>	<b>142</b>
		P	N

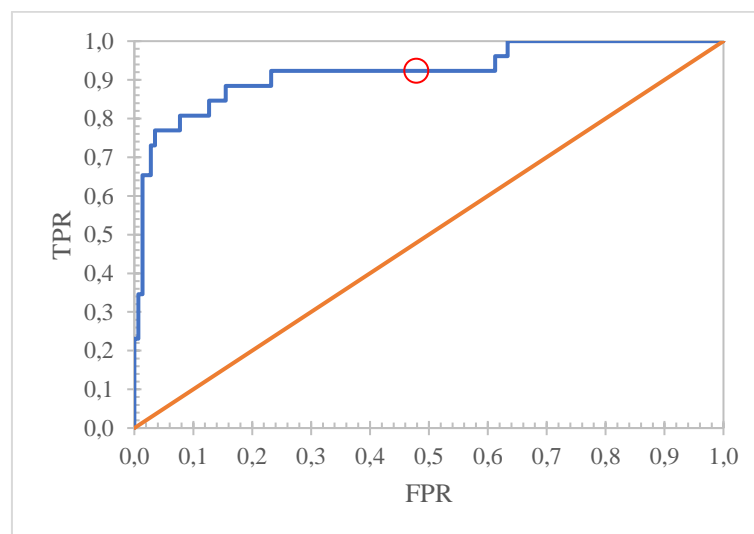


Figura 10. Curva ROC del umbral usando el Método Dfl

El análisis de este método arrojó resultados interesantes, visualmente se podría decir que el umbral tiene una buena capacidad predictiva ya que obtuvo un área bajo la curva fue del 92%, pero los parámetros de exactitud y cantidad de falsas alarmas dieron resultados que muestran lo contrario, pues se obtuvieron valores del 52% y 56% respectivamente. Este resultado se puede confirmar comparando el indicador ROC marcado en rojo (Figura 10), con la teoría descrita por Fawcett (2005) quien menciona que los puntos que tienden a esta más hacia la parte superior-derecha del eje “y”, son considerados como liberales, es decir, que sin necesidad de muchos datos clasifican correctamente casi todas las instancias positivas, pero tienen elevadas tasas de falsas alarmas. De manera general el umbral no presenta una buena capacidad predictiva por lo que su uso en un sistema de alarma podría resultar poco eficiente.

A pesar de haber obtenido un menor porcentaje de área bajo la curva, el umbral calculado por el método Dtot obtuvo un mejor rendimiento que el umbral calculado por el método Dfl, esto se debe a que los parámetros de exactitud y falsas alarmas, que dieron resultados significativamente mejores, estos parámetros son más sensibles a la hora de determinar las bondades de un umbral.

### **3.2. Análisis cronológico de lluvias**

Observando la gran cantidad de falsas alarmas que presentaban los umbrales, se llevó a cabo un análisis de la distribución cronológica de todas las lluvias que superaron el umbral para intentar entender o encontrar una razón del porqué de este comportamiento. Para esto se calculó la diferencia entre la intensidad de la lluvia, intensidad media o intensidad flotante máxima según sea el caso, y la intensidad del umbral y se las representó de manera cronológica tal como lo muestran las Figuras 11 y 12 respectivamente.

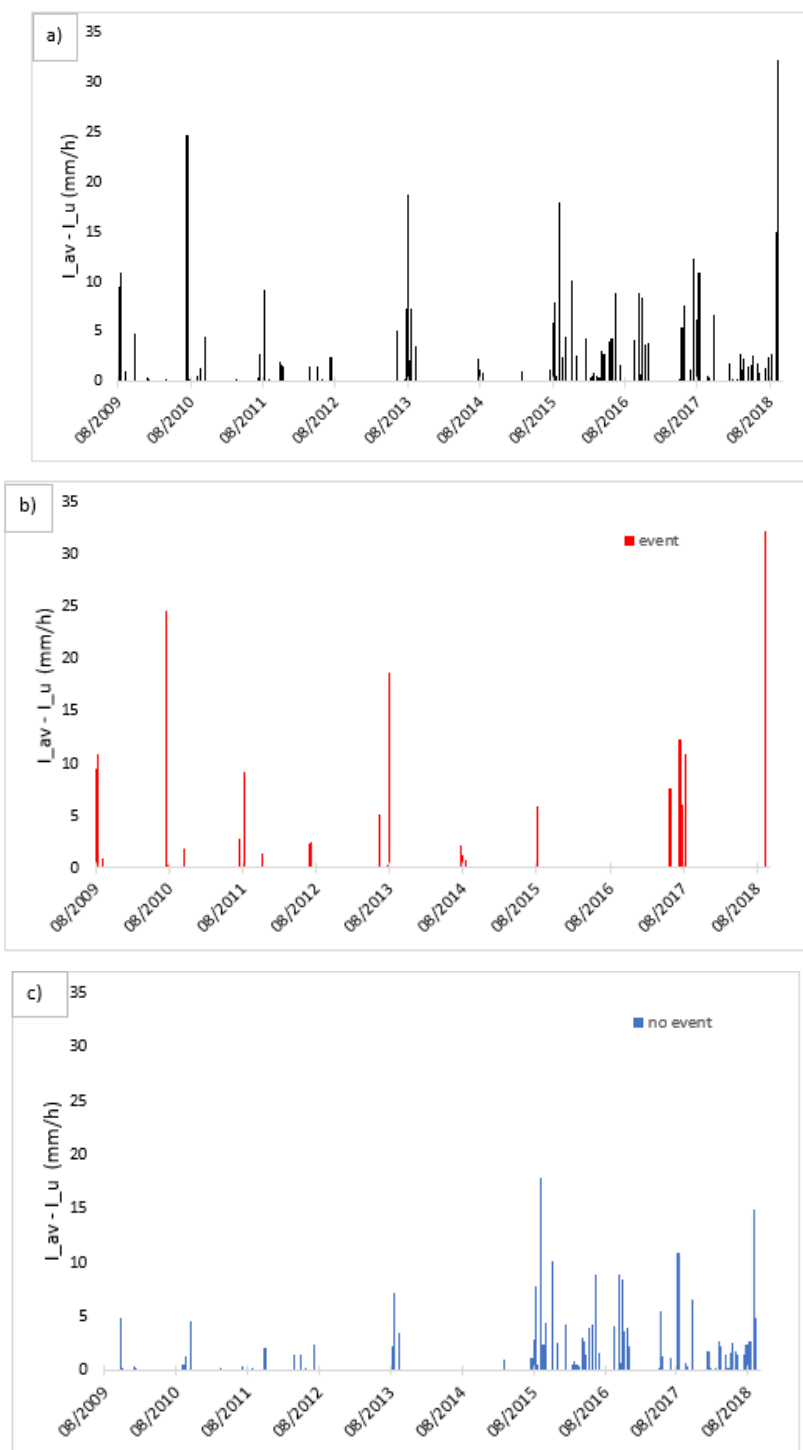


Figura 11. Distribución cronológica de lluvias que superan el umbral. Método Dtot. a) Todas las lluvias que superan el umbral. b) Lluvias que superan el umbral y desencadenan eventos. c) lluvias que superan el umbral y no desencadenan eventos.

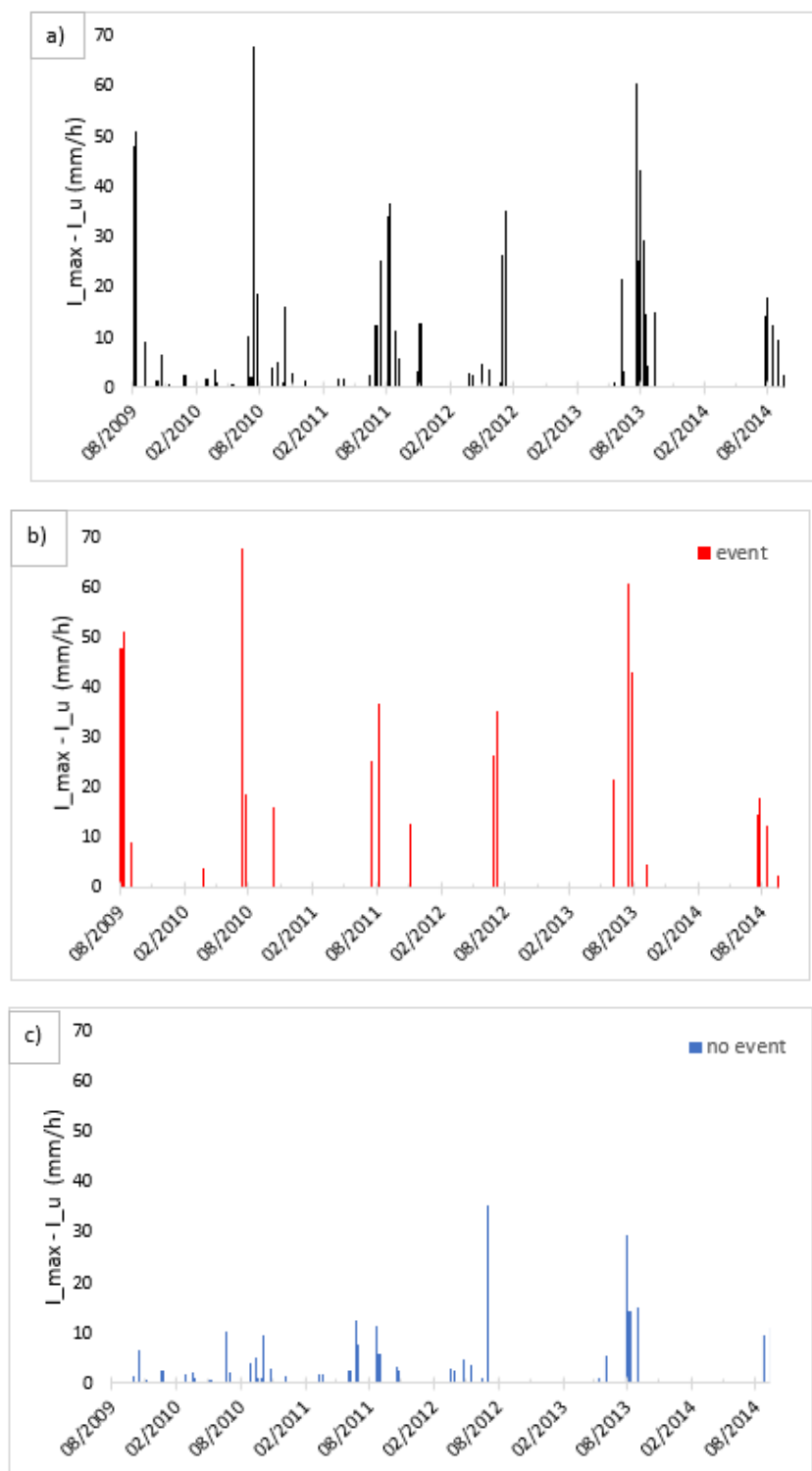


Figura 12. Distribución cronológica de lluvias que superan el umbral. Método Dfl. a) Todas las lluvias que superan el umbral. b) Lluvias que superan el umbral y desencadenan eventos. c) lluvias que superan el umbral y no desencadenan eventos.

Un primer análisis de estas lluvias evidencia que están concentradas en los meses de verano, con unas pocas excepciones. Ahora, si se observan las figuras 11.c) y 12.c) que corresponden a las lluvias que superan el umbral y no desencadenan eventos se puede identificar que estas lluvias se dan con una frecuencia muy alta, y en algunos casos tienen una mayor magnitud que lluvias que si desencadenan eventos. Este inesperado comportamiento plantea nuevas inquietudes con respecto al desencadenamiento de flujos torrenciales. Entre las principales están la elección de condiciones para definir los episodios de lluvia, como: i) el tiempo de 1 hora escogido para la definir la duración de la lluvia y ii) que la cantidad mínima de lluvia diaria sea de 10mm.

Existen documentos en los que se habla sobre la definición de la duración de la lluvia y su importancia de cara a la definición de umbrales, sin embargo, en la mayoría no se muestra un análisis numérico que demuestre su influencia. Para despejar estas inquietudes se plantea calcular nuevos umbrales de lluvia variando el parámetro de duración entre eventos de lluvia y tomando todos episodios de lluvia sin imponer un mínimo de cantidad de lluvia diaria

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1. Análisis y procesamiento de datos**

Para el análisis de umbrales de lluvia se cuenta con un gran volumen de datos obtenidos mediante un complejo sistema de monitorización, descrito el en capítulo 2.4, del cual se extrajo un registro de lluvias correspondiente a diez años, con toma de datos cada cinco minutos, así como también un registro de eventos de flujos torrenciales, 11 corrientes de derrubios y 22 flujos hiperconcentrados.

La tarea de comparar como afecta a los umbrales el tiempo de lluvia antecedente para definir la duración de la lluvia y a la variabilidad de la distribución temporal de las lluvias, es un proceso cíclico, en especial la definición de episodios de lluvia, al tenerse una gran cantidad de datos se vuelve una tarea complicada y minuciosa, por lo que se ha de desarrollado un algoritmo usando el software MATLAB, que permita obtener de manera casi automática la definición de los episodios de lluvia con solo variar un dato de partida y clasificarlos según el tipo de evento o no evento.

Este algoritmo también permite procesar de forma rápida los cálculos necesarios para la definición de los umbrales de lluvia junto con sus gráficos correspondientes. Para la definición de



umbrales mediante el método Dfl se tomaron ocho intervalos  $T_{dr}$  para mediante una comparación determinar el que obtiene un mejor desempeño.

En las Tablas 4 y 5 se muestra un resumen de las cantidades de eventos y no eventos obtenidos para cada  $T_{rd}$ . Se observó que la cantidad de eventos se mantiene constante excepto en el caso de  $T_{dr}$  de 24 horas, que al ser un tiempo elevado y en ocasiones se tienen más de un evento por día o días consecutivos el registro de eventos disminuye. En cambio, se puede ver claramente como el registro de no eventos va disminuyendo según aumente el  $T_{rd}$ , también se puede observar que entre el paso de un  $T_{rd}$  de 1 hora al de 2 horas existe una disminución de no eventos considerable, luego esta disminución de no eventos comienza a disminuir y mantiene una tendencia hasta un  $T_{rd}$  de 6 horas, a partir de la cual se vuelve a observar una disminución marcada.

*Tabla 4. Resumen de lluvias que desencadenan eventos.*

Nro.	Fecha	Registro	Tipo de evento	Nro.	Fecha	Registro	Tipo de evento
1	01/08/2009	Evento	debris flow	18	17/06/2013	Evento	debris flood
2	07/08/2009	Evento	debris flow	19	17/07/2013	Evento	debris flow
3	01/09/2009	Evento	debris flood	20	23/07/2013	Evento	debris flood
4	25/03/2010	Evento	debris flow	21	27/07/2013	Evento	debris flood
5	11/07/2010	Evento	debris flow	22	06/09/2013	Evento	debris flood
6	21/07/2010	Evento	debris flood	23	20/07/2014	Evento	debris flood
7	09/10/2010	Evento	debris flood	24	25/07/2014	Evento	debris flood
8	30/05/2011	Evento	debris flood	25	12/08/2014	Evento	debris flow
9	12/07/2011	Evento	debris flood	26	15/09/2014	Evento	debris flood
10	05/08/2011	Evento	debris flood	27	31/07/2015	Evento	debris flood
11	05/08/2011	Evento	debris flood	28	22/05/2017	Evento	debris flood
12	07/08/2011	Evento	debris flood	29	10/07/2017	Evento	debris flow
13	02/11/2011	Evento	debris flood	30	21/07/2017	Evento	debris flow
14	27/06/2012	Evento	debris flow	31	06/08/2017	Evento	debris flood
15	04/07/2012	Evento	debris flow	32	07/08/2017	Evento	debris flood
16	05/07/2012	Evento	debris flood	33	05/09/2018	Evento	debris flow
17	05/06/2013	Evento	debris flood				

Tabla 5. Cantidad de lluvias que no desencadenan eventos para los diferentes  $T_{rd}$ .

Nro.	$T_{rd}$ (h)	Registro	Cantidad
1	1	No evento	2637
2	2	No evento	1799
3	3	No evento	1473
4	4	No evento	1273
5	5	No evento	1158
6	6	No evento	1071
7	12	No evento	807
8	24	No evento	531

## 4.2. Definición de umbrales de lluvia

En el análisis de desencadenamiento de deslizamientos la definición de la duración de la lluvia es un aspecto muy importante, ya que influencia directamente en los resultados. En la literatura se puede encontrar algunos estudios en los que se habla del tema, sin embargo, no se especifica como fue definido, y resulta difícil determinar con exactitud cuál fue el criterio para definir cierto valor, esto reduce la capacidad de comparar algunos parámetros, condiciona la definición y comparación de umbrales de lluvia y limita la posibilidad de usar umbrales en sistemas de alertas (Melillo, Brunetti, Peruccacci, Gariano, & Guzzetti, 2014).

Al igual que en los umbrales existentes se usará los métodos  $D_{tot}$  y  $D_{fl}$  para definir nuevos umbrales de lluvia, pero para definir los episodios de lluvia se analizarán nueve  $T_{rd}$  y no se usará la condición de que la lluvia diaria sea mayor a 10 mm.

### 4.2.1. Método de la duración total ( $D_{tot}$ ).

Primero se representó cada uno de los episodios de lluvia como un solo punto en un gráfico  $D_{tot}$  vs  $I_{av}$  en escala logarítmica, luego visualmente se seleccionaron los eventos que quedaban más por debajo y se ajustó una línea con una ley potencial de la forma  $I = \alpha D^{-\beta}$ , de modo que todos los eventos queden por encima y de que se obtenga la menor cantidad de falsas alarmas, en la Figura 13 se muestra un ejemplo del umbral obtenido para un  $T_{rd}$  de 4 hora.

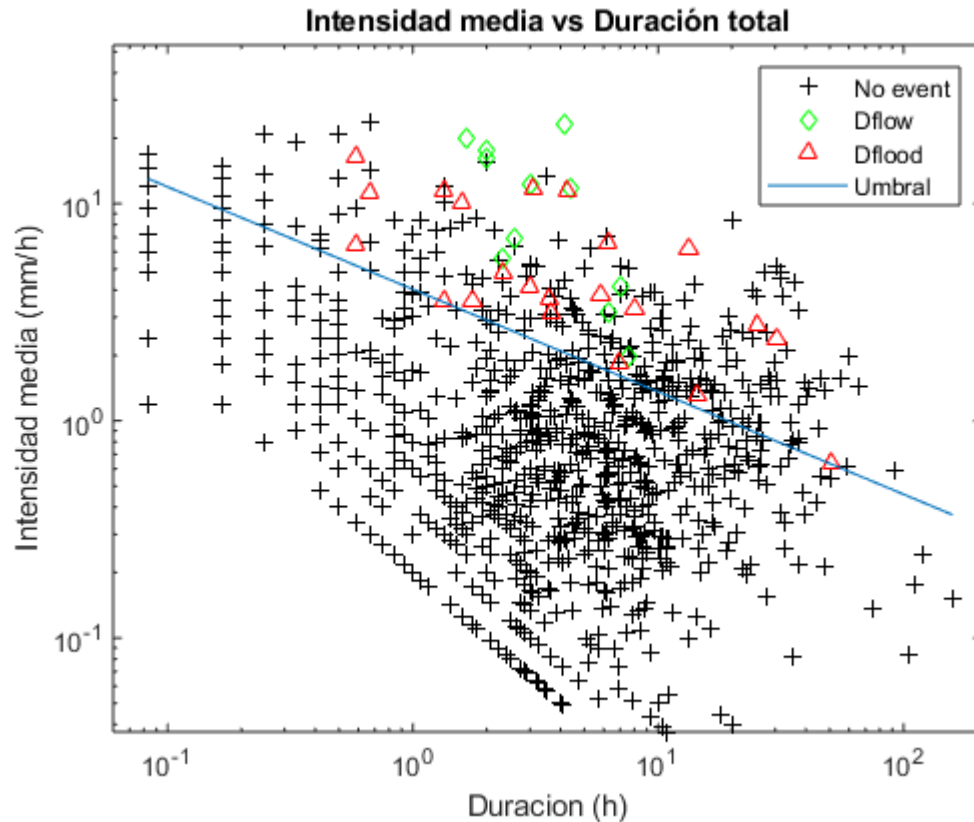


Figura 13. Umbral por el método  $D_{tot}$  con  $T_{rd}$  de 4h.

#### 4.2.2. Método de la duración flotante (Dfl).

La definición de umbrales bajo este método resulta una tarea más compleja debido a que se debe realizar un análisis minucioso de las intensidades para cada una de las ocho duraciones flotantes escogidas y también porque cada episodio de lluvia no representa un solo punto sino un conjunto de puntos en un espacio I-D, y cada uno de estos puntos representa la máxima intensidad posible analizada para una determinada duración flotante. Luego de graficar cada uno de los episodios de lluvia, se realizó una primera aproximación de definir una envolvente inferior, y se calculó cual es punto dentro de cada episodio de lluvia que está más alejado del umbral preliminar, siendo este punto el que desencadenaría el evento, en la Figura 14 se muestran con un marcador más grande los puntos de los episodios de lluvia que están más alejados del umbral. En la Figura 15 se representan los puntos que obtuvieron esta máxima diferencia y sobre esta figura se definió el umbral de lluvia definitivo haciendo que todos los eventos queden por encima.

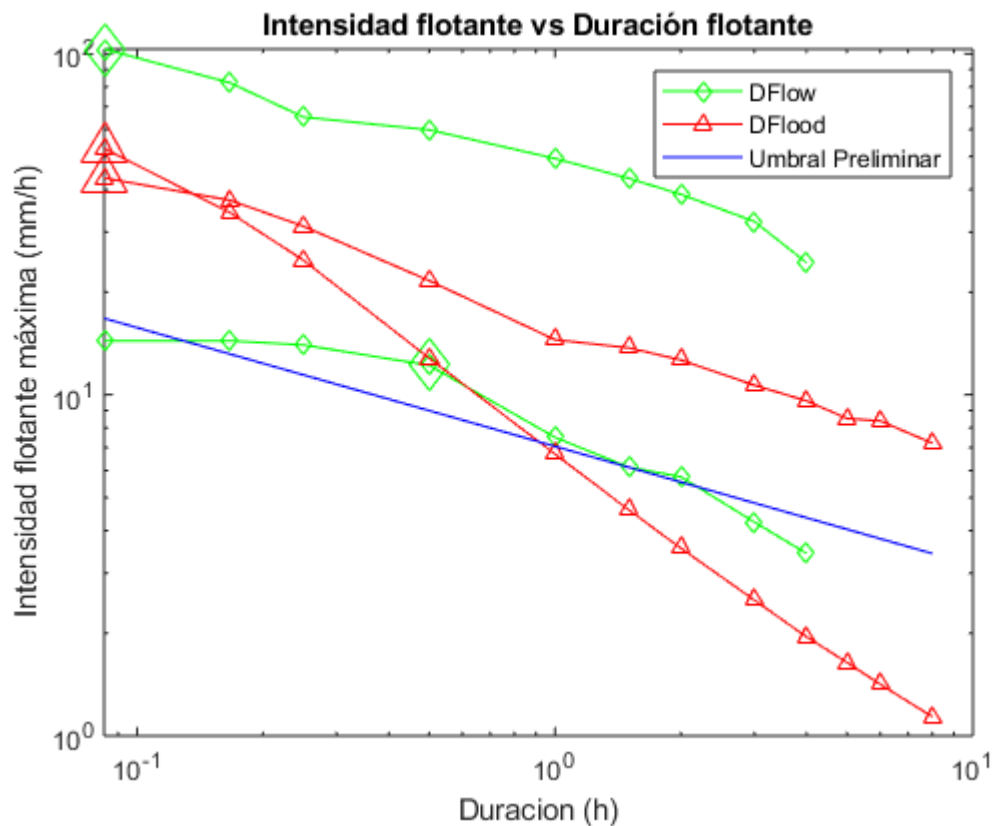


Figura 14. Representación de episodios de lluvia y umbral preliminar, método D<sub>fl</sub>

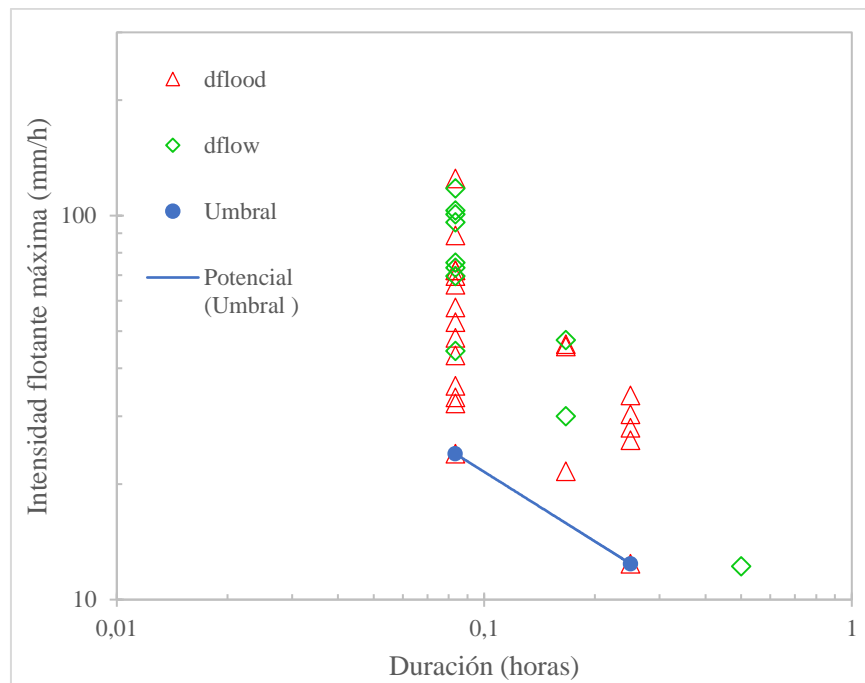


Figura 15. Intensidades con la máxima diferencia intensidad de lluvia-umbral preliminar.

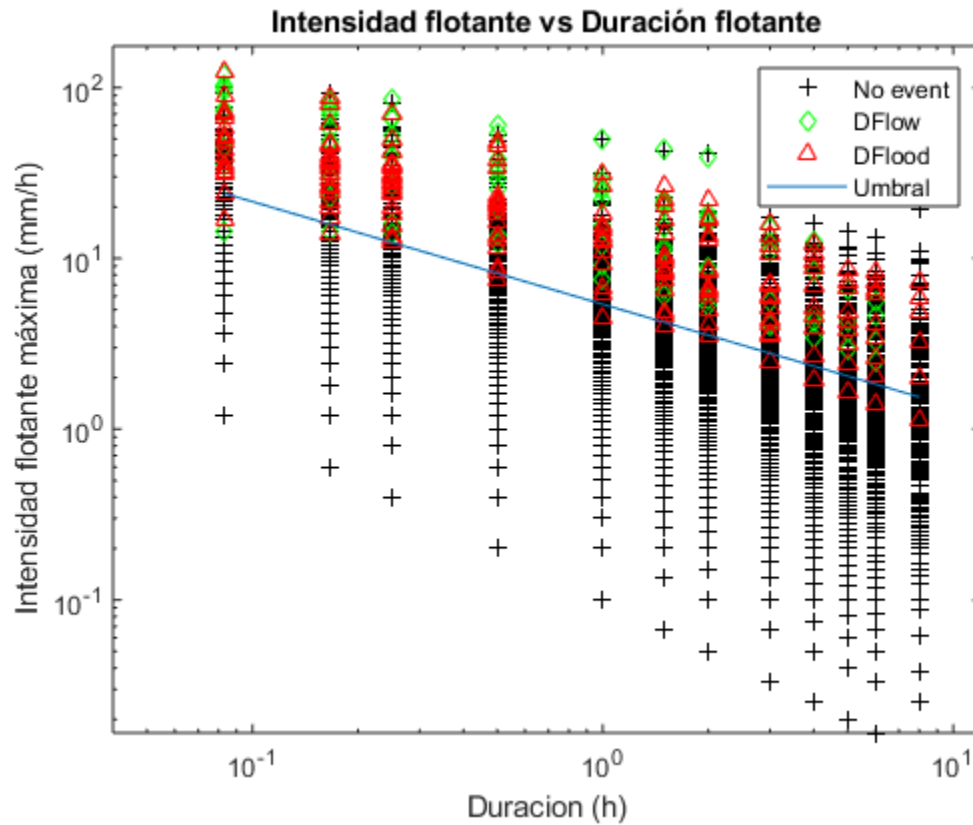


Figura 16. Umbral definitivo obtenido mediante el método Dfl.

En la Figura 16 se muestra el umbral definitivo. A simple vista parecería que existen algunos eventos que están por debajo del umbral, sin embargo, esto no es así, pues en la gráfica están representados todos los puntos que forman cada episodio de lluvia y no solo los de máxima diferencia. Esos puntos que están por debajo tendrán un punto crítico que estará por encima del umbral, manteniendo el umbral como una envolvente inferior.

## 5. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis para el umbral con un tiempo de duración entre episodios de lluvia de 1 hora, el cual fue seleccionado como el umbral que presentó mejores características. Para observar las gráficas de los umbrales correspondientes a los demás tiempos entre episodio de lluvia referirse al Anexo B.

### 5.1. Caracterización de lluvias que desencadenan eventos

Con el objetivo de caracterizar las lluvias que desencadenan flujos torrenciales se propuso el análisis de algunos indicadores, como: i) cantidad de lluvia y duración mínima para desencadenar eventos, ii) relación intensidad media y volumen movilizado, iii) variabilidad de la lluvia y iv) la frecuencia con la que ocurren.

- i) Del análisis de la Figura 17 se observa que las lluvias que desencadenaron flujos hiperconcentrados abarcan un rango de duración entre 35 minutos y 12 horas y una mínima cantidad de lluvia de 4 mm, mientras que las que desencadenan corrientes de derrubios tienen un rango entre 1.5 y 5 horas y una mínima cantidad de lluvia de 13 mm.
- ii) La relación intensidad media versus volumen movilizado representado en la Figura 18 permite distinguir que los flujos hiperconcentrados movilizan una menor cantidad de material, siendo 3700 m<sup>3</sup> el máximo volumen, mientras que las corrientes de derrubios movilizan volúmenes en un amplio rango entre 2000 y 16000 m<sup>3</sup>. También se aprecia que la magnitud de la intensidad media de la lluvia no está directamente relacionada con el volumen de material movilizado, pues para un mismo valor de intensidad media se tiene diferentes magnitudes de volumen movilizado.

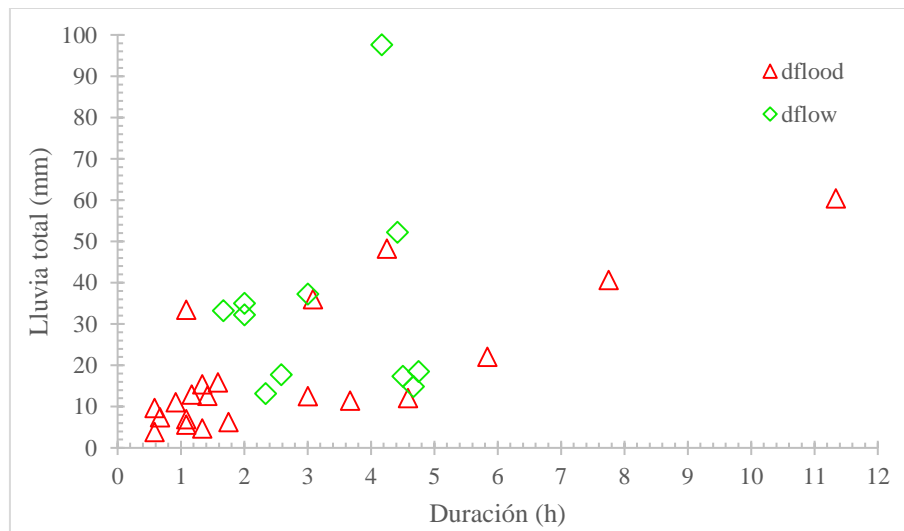


Figura 17. Caracterización de lluvias que desencadenan eventos (Lluvia vs Duración).

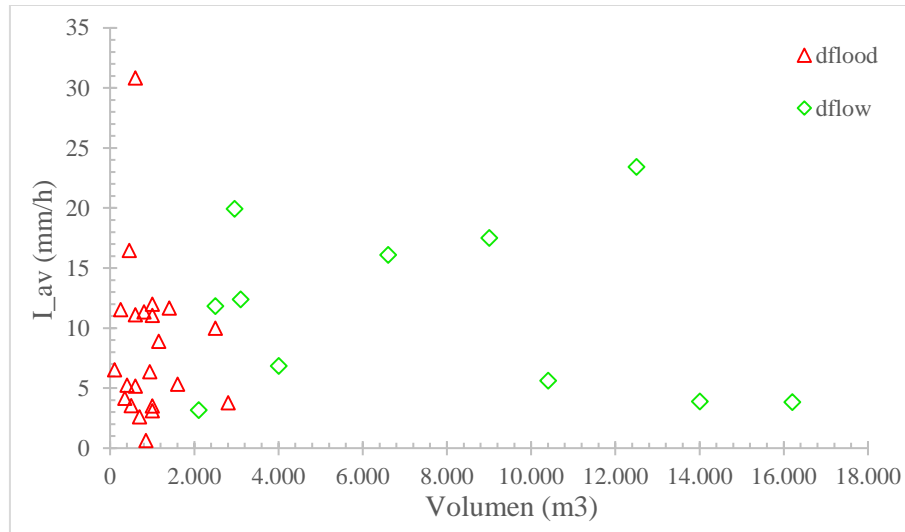


Figura 18. Caracterización de lluvias que desencadenan eventos ( $I_{av}$  vs Volumen).

iii) El otro factor para analizar es la variabilidad de la lluvia conforme varía el tiempo entre episodio de lluvia, para esto se obtuvieron los valores máximos, mínimos y el promedio de las intensidades  $I_{av}$  e  $I_{max}$  para cada uno de los tiempos  $T_{rd}$  (Tabla 6). En la Figura 19.a) correspondiente al método  $D_{tot}$  se puede observar una tendencia a disminuir conforme aumenta  $T_{rd}$ , siendo más evidente en los valores de  $I_{av}$  mínimos, cuyo rango de variación es de casi un orden de magnitud, mientras que los valores máximos y medios presentan una mayor variación inicial y luego se vuelve casi constante.

Mientras que en la Figura 19.b) correspondiente al método  $D_{fl}$  se observa que los tres valores presentan tendencias diferentes conforme aumenta  $T_{rd}$ , los valores máximos permanecen constantes, los medios tienden a aumentar y los mínimos tienden a disminuir, de igual manera que en el anterior método los mínimos disminuyen en un rango de un orden de magnitud.

Tabla 6. Variabilidad de la lluvia según varía  $T_{rd}$ .

$T_{rd}$ (h)	Método Dtot			Método Dfl		
	$I_{av}$ máx. (mm/h)	$I_{av}$ min (mm/h)	$I_{av}$ media (mm/h)	$I_{max}$ máx (mm/h)	$I_{max}$ min (mm/h)	$I_{max}$ media (mm/h)
1	36,00	0,13	2,04	124,8	0,15	5,24
2	23,70	0,08	1,86	124,8	0,08	5,71
3	23,70	0,05	1,80	124,8	0,05	6,29
4	23,70	0,04	1,79	124,8	0,04	6,73
5	23,42	0,03	1,71	124,8	0,03	7,01
6	23,42	0,02	1,66	124,8	0,03	7,26
12	23,42	0,02	1,56	124,8	0,01	7,29
24	23,42	0,01	1,30	124,8	0,01	8,24

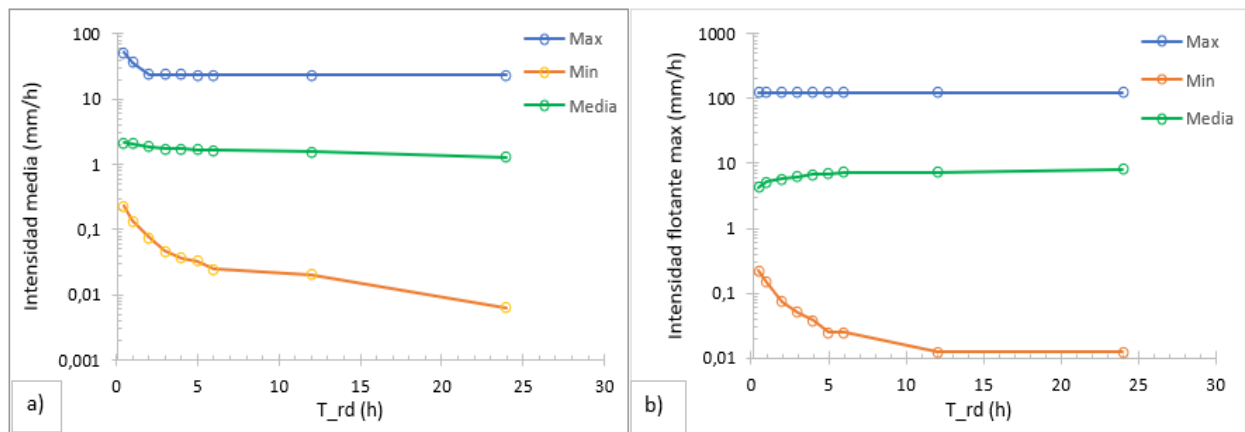


Figura 19. Variabilidad de la lluvia según varía  $T_{rd}$ . a) Método Dtot. b) Método Dfl,

- iv) Por último, se analizó la frecuencia con la que han ocurrido los eventos con relación a su duración total. Como se observa en la Figura 20 la mayor frecuencia de eventos está concentrada en duraciones desde media hora hasta 5 horas, especialmente en lluvias con duración de 1 a 2 horas, sumando un total de 12. A partir de este grafico se puede obtener la probabilidad de ocurrencia de eventos, lluvias con duración entre 1 a 2 horas tienen la mayor probabilidad de ocurrencia con un 36%, seguidas por las de duración entre 4 y 5 horas con un 21%, mientras que lluvias con duraciones mayores a 5 horas tan solo presentan un 12% de probabilidad de ocurrencia.



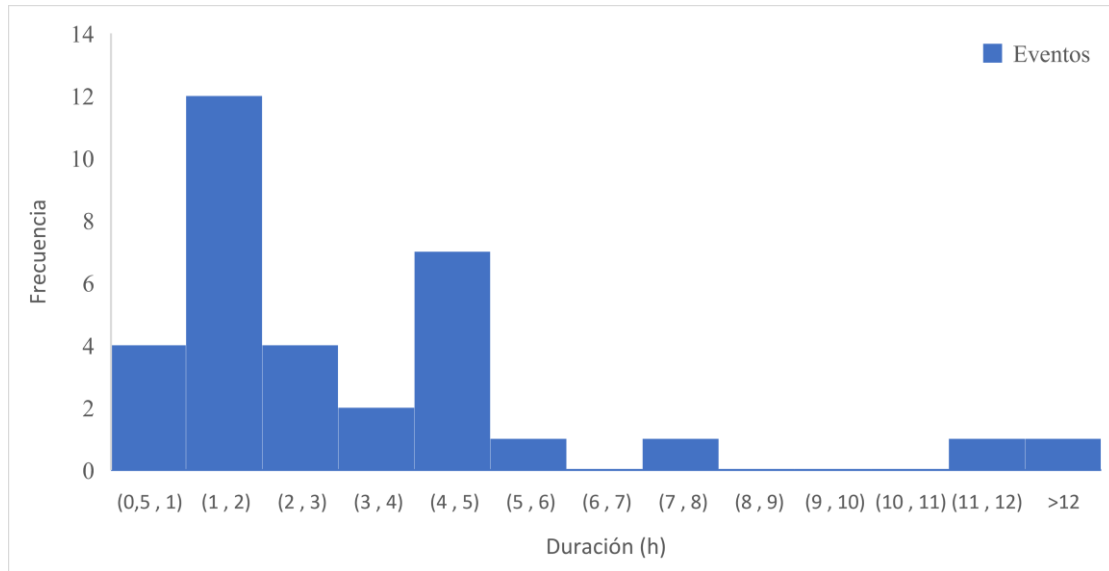


Figura 20. Frecuencia de ocurrencia de eventos.

## 5.2.Propuesta de umbrales de lluvia

La definición de umbrales de lluvia es de gran interés en el estudio de deslizamientos superficiales y flujos torrenciales, pues permiten implementar un sistema de alarma temprana basados en la intensidad y duración de lluvia. Estos umbrales deben servir para proteger posibles zonas urbanas o infraestructura que pueda ser afectada por estos deslizamientos, y al no incluir en su análisis características del suelo como resistencia y permeabilidad, y otros factores externos como la geología y topografía de la zona, hacen que la precisión de estos umbrales disminuya.

Con el objetivo de mejorar el conocimiento de este tema y mediante el análisis de la influencia que tiene el tiempo para definir la duración de la lluvia ( $T_{rd}$ ), se definieron umbrales para diferentes  $T_{rd}$  y mediante diferentes métodos. En las Tabla 7 y 8 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, en donde se puede apreciar las ecuaciones que definen los umbrales de lluvia y los parámetros del ROC análisis.

Tabla 7. Resumen de resultados usando el Método Dtot.

Método Dtot					
Tiempo definición de duración de lluvia (h)	Umbral	Área bajo la curva (%)	Exactitud (%)	Lluvias sobre el umbral que no generan eventos (%)	Falsas alarmas (%)
1	$I = 4,03 D^{-0,478}$	97	89	90	11
2	$I = 4,03 D^{-0,472}$	96	86	89	14
3	$I = 4,03 D^{-0,472}$	96	85	87	15
4	$I = 4,03 D^{-0,472}$	95	84	86	16
5	$I = 4,03 D^{-0,472}$	95	84	85	16
6	$I = 4,03 D^{-0,472}$	95	84	84	17
12	$I = 4,11 D^{-0,533}$	94	81	84	20
24	$I = 5,69 D^{-0,669}$	91	75	89	26

Tabla 8. Resumen de resultados usando el Método Dfl.

Método Dfl					
Tiempo definición de duración de lluvia (h)	Umbral	Área bajo la curva (%)	Exactitud (%)	Lluvias sobre el umbral que no generan eventos (%)	Falsas alarmas (%)
1	$I = 7,06 D^{-0,348}$	98	91	88	9
2	$I = 5,38 D^{-0,601}$	98	86	88	14
3	$I = 5,38 D^{-0,601}$	98	84	88	16
4	$I = 5,38 D^{-0,601}$	97	83	87	18
5	$I = 5,38 D^{-0,601}$	97	82	87	19
6	$I = 5,38 D^{-0,601}$	97	81	87	20
12	$I = 3,23 D^{-0,97}$	95	62	91	40
24	$I = 8,08 D^{-0,685}$	96	76	88	25

La Figura 21 muestra una comparación del umbral obtenido mediante el método  $D_{tot}$  para un  $T_{rd}$  de una hora y el umbral propuesto por Hürlimann et al. (2019) mencionado en el apartado 2.4.3.1, el cual está definido para la misma zona. Se observa que el umbral propuesto por Hürlimann et al. (2019) presenta una pendiente mayor con lo cual disminuye la cantidad de falsas alarmas, pero deja un tercio de los eventos (9 flujos hiperconcentrados y 2 corrientes de derrubios) bajo el umbral. Este comportamiento difiere al descrito en Hürlimann et al. (2019), pues solo 4 flujos hiperconcentrados quedaban bajo el umbral. Este cambio en el comportamiento del umbral puede deberse a que se eliminó la condición de que la lluvia diaria supere los 10 mm lo que afecta la definición de los episodios de lluvia.

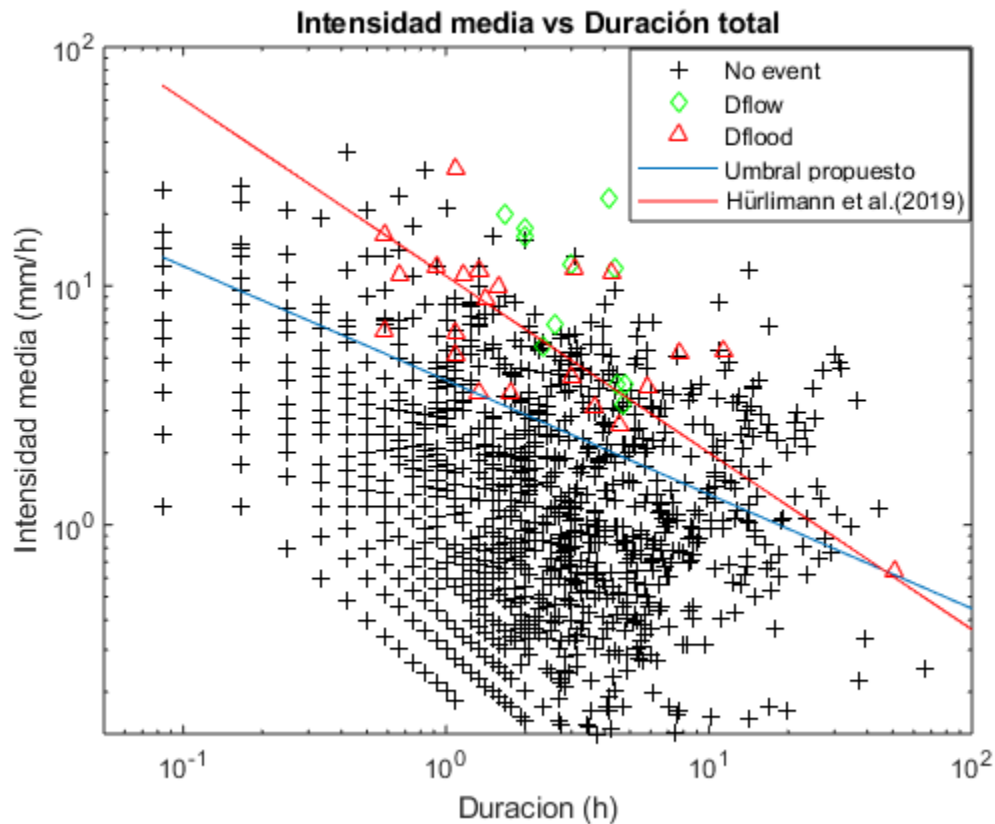


Figura 21. Comparación de umbrales para el Barranco Rebaixader, método  $D_{tot}$ ,  $T_{rd}=1h$ .

En la Figura 22 se eliminaron los puntos correspondientes a los episodios de lluvias que no desencadenaron eventos y se incluyeron dos umbrales más a los mostrados en la Figura 21, uno definido por Caine (1980) el cual es un umbral global definido para condiciones de intensidad media y duración total. El cual menciona que su umbral global definido por la ecuación  $I = 14,82 D^{-0,39}$ , se ajusta bien para lluvias con duraciones entre 10 minutos y 10 días, pues en lluvias con

menores duraciones no existe suficiente profundidad de infiltración de agua para cambiar la presión de poros en el suelo, mientras que en lluvias con duraciones superiores a 10 días pueden existir intensidades de lluvia que superen ampliamente la intensidad media. El otro umbral es el propuesto por (Badoux, Graf, Rhyner, Kuntner, & McArdeU, 2008)  $I = 5.4 D^{-0.79}$ , el cual fue definido para la cuenca Illgraben con una extensión de 9.5 km<sup>2</sup> ubicada en los Alpes suizos, este umbral fue definido como una envolvente inferior, pues todas las corrientes de derrubios quedan por encima, y se usó un tiempo de definición de duración de lluvia de seis horas.

El umbral propuesto por (Caine, 1980) muestra una pendiente similar al umbral aquí propuesto, pero está bastante distanciado. A pesar de que todos los eventos registrados están en el rango de 10 minutos a 10 horas el umbral no se ajusta bien pues solo clasifica correctamente 9 eventos mientras que los 24 eventos restantes quedan por debajo del umbral.

El umbral propuesto por Badoux et al. (2008) a pesar de estar definido para otra cuenca y con un tiempo de definición de duración de lluvia diferente se ajusta relativamente bien a las condiciones del Barranco Rebaixader, pues clasifica correctamente 31 de 33 eventos. Este umbral presenta una pendiente bastante marcada, lo cual hace que la cantidad de lluvias que no desencadenan eventos queden por encima del umbral, aumentando la cantidad de falsas alarmas.

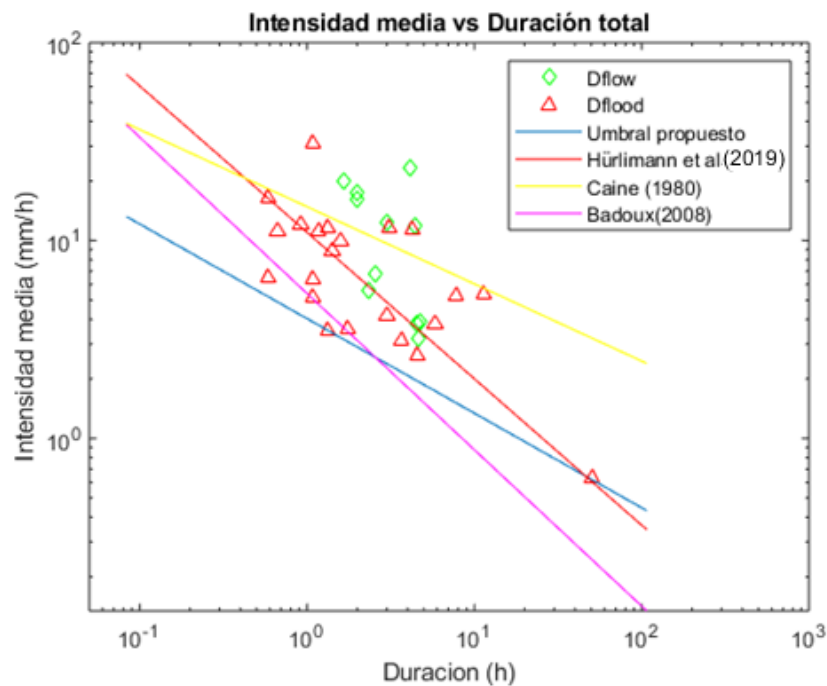


Figura 22. Comparación del umbral propuesto versus umbrales existentes usando el método Dt<sub>tot</sub>.

La Figura 23 muestra la comparación del umbral aquí propuesto y el propuesto por Abancó et al. (2016), ambos umbrales definidos usando la duración flotante y para la misma zona, con la diferencia de que el segundo tiene un registro con una menor cantidad de datos y una condición adicional para la selección de episodios de lluvias. Se observa que el umbral propuesto por Abancó et al. (2016) presenta una pendiente más elevada dejando fuera algunos eventos y aumentando la cantidad de falsas alarmas.

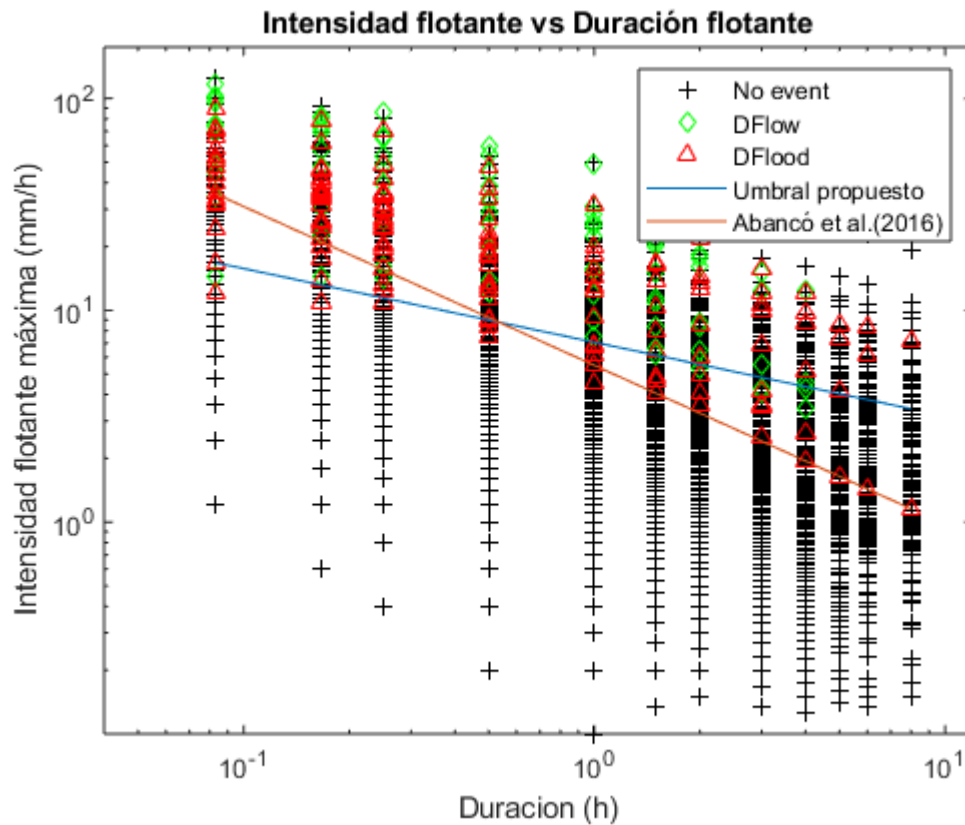


Figura 23. Comparación de umbrales definidos para el Barranco Rebaixader por el método Dfl.

Como se pudo comprobar, la implementación de umbrales globales o de zonas diferentes, ya sean en condiciones similares a las de la zona de estudio o no, en un sistema de alerta es una decisión no tan acertada pues como se observó en las comparaciones antes realizadas, ningún umbral se ajustó de manera eficiente, incluso solo la forma en cómo se procesan los datos puede modificar significativamente el resultado. Estos umbrales pueden ser usados como envolventes preliminares tratando de calibrarlos lo máximo posible con datos de la zona de estudio.

### 5.2.1. ROC análisis de umbrales de lluvia propuestos

Con el objetivo de determinar cuál de los dos métodos usados para definir umbrales de lluvia es el que mejores características presenta, se realizó un ROC análisis para el umbral definido con un tiempo de definición de duración de lluvia correspondiente a una hora.

#### 5.2.1.1. Método de la duración total ( $D_{tot}$ ).

Como lo muestra la curva ROC en la Figura 24 el umbral presenta buena capacidad de predecir la ocurrencia de eventos de flujo torrencial, debido a su rápido ascenso vertical hasta llegar al punto máximo y de ahí en adelante se mantiene horizontal, abarcando un área bajo la curva del 97%, este comportamiento de llegar al pico y mantenerse constante es una característica de las envolventes inferiores ya que por definición el total de eventos están sobre esta. Otro aspecto para tener en cuenta en esta gráfica es que la ubicación del punto rojo está muy cerca del punto (1,0) que indica una clasificación perfecta. No obstante, estos parámetros no son suficientes para dar una resolución final acerca del rendimiento del umbral, también es necesario analizar los parámetros que provienen de la matriz de confusión (Tabla 9), los valores obtenidos de exactitud, falsas alarmas y cantidad de lluvias que superan el umbral y no desencadenan eventos fueron: 89%, 11% y 90% respectivamente. Analizando el umbral de manera general se puede decir que presenta un buen desempeño y capacidad de predicción sin embargo presenta un elevado porcentaje de lluvias que superan el umbral y no desencadenan eventos, dando lugar a falsas alarmas.

Tabla 9. Matriz de confusión para el umbral definido mediante el método  $D_{tot}$  y  $T_{rd}$  de 1 hora

		Evento	
		p	n
Predicción umbral	Y	33	294
	N	0	2343
		33	2637
		P	N

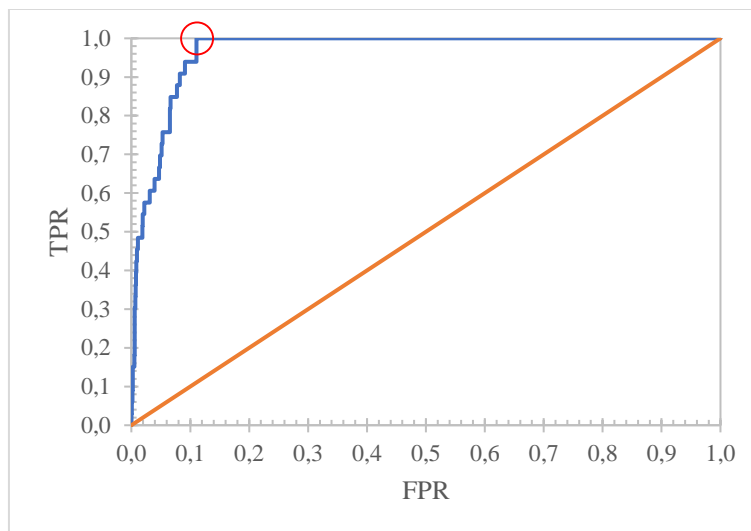


Figura 24. Curva ROC para el umbral definido mediante el método  $D_{tot}$  y  $T_{rd}$  de 1 hora

#### 5.2.1.2. Método de la duración flotante ( $D_{fl}$ ).

La curva ROC mostrada en la Figura 25 muestra un mejor desempeño que la del método anterior, pues sigue una trayectoria bastante vertical hasta llegar al máximo y el indicador ROC marcado en rojo está muy cerca del punto (1,0), tiene un área bajo la curva del 98% y una exactitud o aciertos del 91% lo que indica que tiene una muy buena capacidad para predecir la ocurrencia de eventos, la cantidad de falsas alarmas también tiene un valor positivo pues es del 9% pero el valor correspondiente a la cantidad de episodios de lluvia que superan el umbral y no generan eventos sigue siendo un valor elevado igual al 88%.

Tabla 10. Matriz de confusión para el umbral definido mediante el método  $D_{fl}$  y  $T_{rd}$  de 1 hora

		Evento	
		p	n
Predicción umbral	Y	<b>33</b>	<b>235</b>
	N	<b>0</b>	<b>2402</b>
		<b>33</b>	<b>2637</b>
		P	N

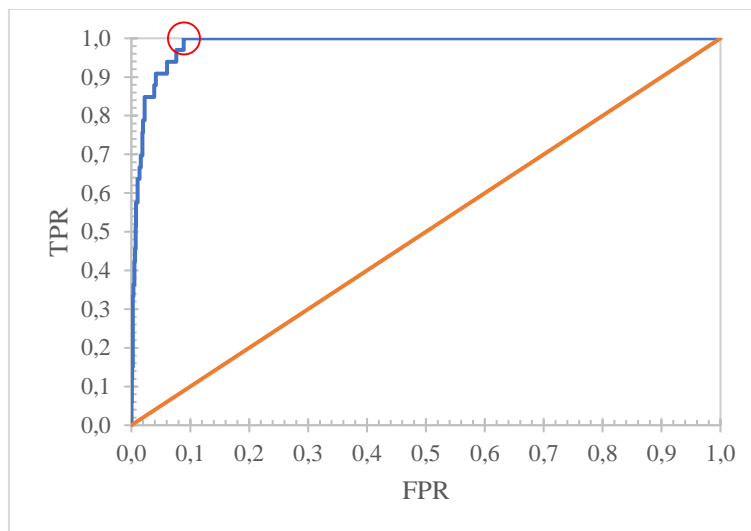


Figura 25. Curva ROC para el umbral definido mediante el método Dfl y T<sub>rd</sub> de 1 hora

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ROC análisis el umbral que presenta un mejor desempeño para la implementación en un sistema de alarma, es el definido mediante el método que usa parámetros de duración flotante, además este método presenta una ventaja frente al método que usa parámetros de duración total, y es que se puede implementar de forma directa en un sistema de alarma, ya que no se necesita esperar a que termine la lluvia para realizar el análisis, si no que conforme va transcurriendo la lluvia automáticamente se realiza el análisis y se compara cuál es su posición en relación al umbral, si es que se acerca o aleja de él.

### 5.3. Análisis de lluvias que superan el umbral

Una vez definidos los nuevos umbrales de lluvia se volvió a realizar un análisis sobre cómo están distribuidas las lluvias que superan estos umbrales. Este nuevo análisis confirma la tendencia encontrada en el apartado 3.2, las lluvias que superan el umbral y no desencadenan eventos siguen siendo muy frecuentes. Esto pone en evidencia que el desencadenamiento de flujos torrenciales no depende únicamente de la presencia de lluvia, sino que intervienen otros factores, como la topografía del terreno, disponibilidad de material en el área fuente y características propias del suelo.

Este análisis sirvió para descubrir que existe un cambio en el comportamiento en las lluvias que superan el umbral a partir del verano del 2014, en especial las que no desencadenan flujos torrenciales, estas se vuelven mucho más frecuentes y en algunos casos con mayor intensidad como



lo muestran las Figuras 27.c) y 28.c). Este cambio en el comportamiento coincide con la corriente de derrubios del 13 de agosto del 2014, el segundo evento de mayor magnitud, en el cual se formó un muro de grandes bloques en el pie del área fuente, como se muestra en la Figura 26, que actúa como una presa de sedimentos que dificulta la formación de nuevos flujos torrenciales desde entonces. Esto también se ve reflejado en una disminución en la frecuencia de eventos que se han formado desde esa fecha como se observa en las Figuras 27.b) y 28.b).

Otra comparación apreciable es la gran diferencia en la magnitud de las lluvias que superan el umbral entre el método de la duración flotante versus el método de la duración total, siendo el primero el que presenta magnitudes considerablemente mayores.



*Figura 26. Muro de bloques formado por el debris flow del 13 de agosto de 2014*

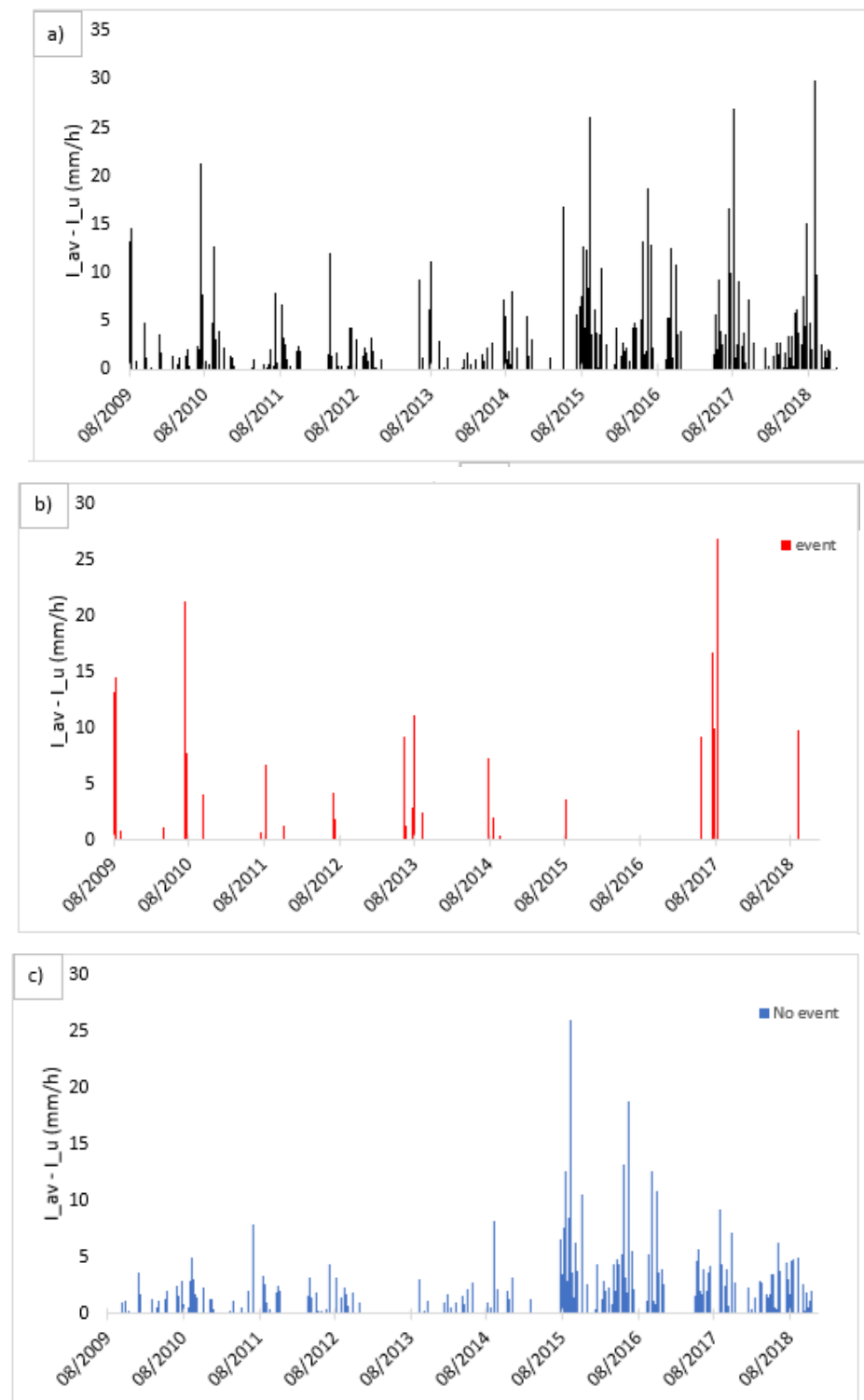


Figura 27. Distribución cronológica de lluvias que superan el umbral. Método Dtot. a) Todas las lluvias que superan el umbral. b) Solo lluvias que desencadenan eventos. c) Solo lluvias que no desencadenan eventos.

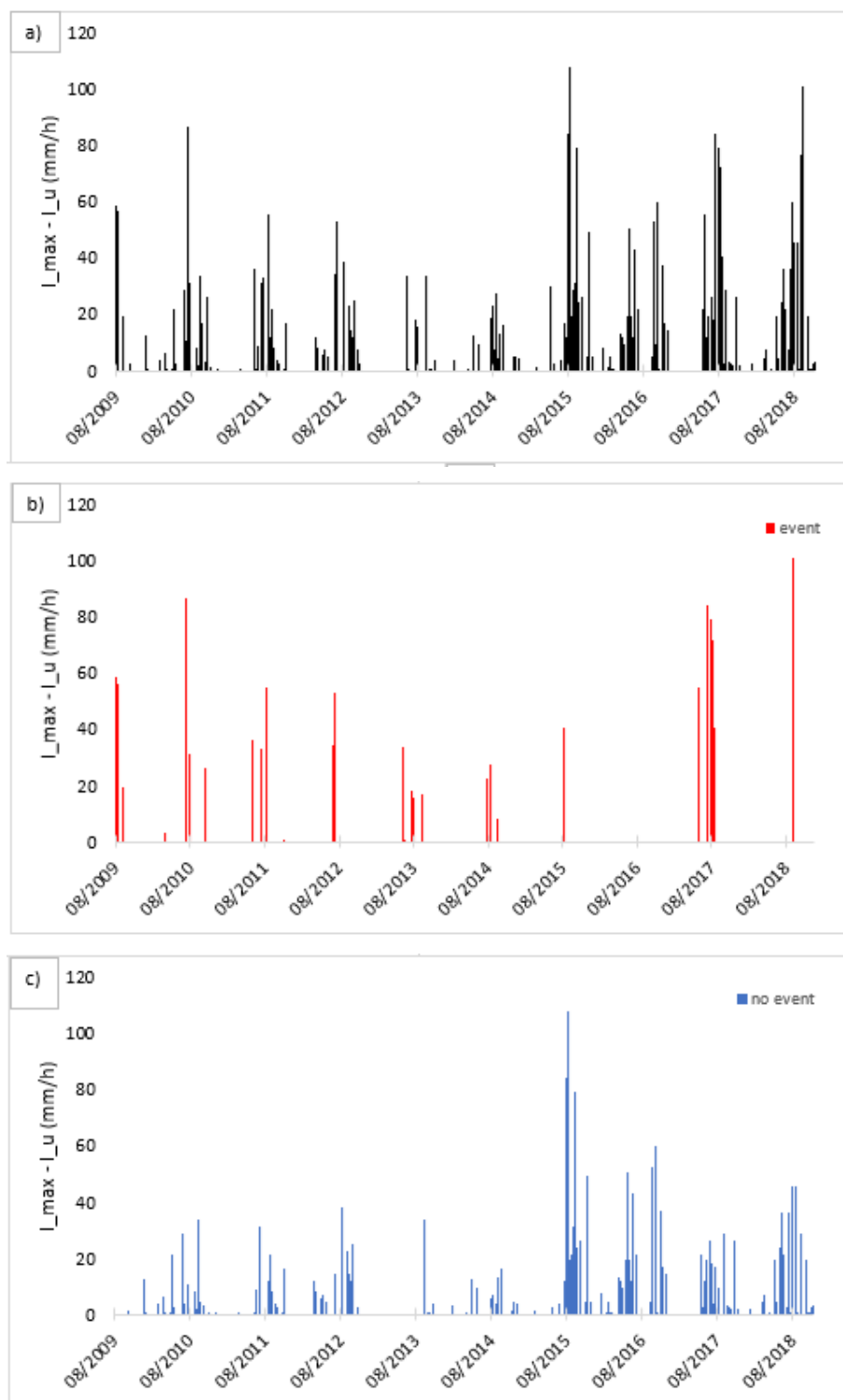


Figura 28. Distribución cronológica de lluvias que superan el umbral. Método Dfl. a) Todas las lluvias que superan el umbral. b) Solo lluvias que desencadenan eventos. c) Solo lluvias que no desencadenan eventos.

Otra forma de comprobar este cambio en el comportamiento es mediante el análisis magnitud – frecuencia de las lluvias que superan el umbral. Con la finalidad de obtener una mejor representación visual se usó el periodo de retorno en vez de la frecuencia, y se calculó la diferencia entre la intensidad de la lluvia, ya sea la intensidad media ( $I_{av}$ ) o la intensidad flotante máxima ( $I_{max}$ ) según sea el caso, y la intensidad del umbral ( $I_u$ ), como se muestra en las Figuras 29 y 30.

Por ejemplo, si analizamos la tendencia que presentan las lluvias previas al 13 de agosto de 2014, usando el método de la duración total, Figura 29.a), se observa que tanto las lluvias que desencadenan eventos como las que no, tienen una tendencia logarítmica, va aumentando el periodo de retorno conforme aumenta la intensidad hasta un punto en el que la intensidad tiende a mantenerse constante, mientras que las lluvias que superan el umbral y no desencadenan eventos posteriores a la fecha indicada, Figura 29.b), muestran una tendencia lineal creciente, reduciéndose el periodo de retorno en aproximadamente una sexta parte mientras que la magnitud incremento en casi el doble.

Además del cambio en el comportamiento de las lluvias previas y posteriores a al 13 de agosto de 2014, se observa un cambio en el comportamiento de las lluvias según el método que se usó para definir el umbral, lluvias definidas por el método de la duración flotante reflejan intensidades mayores y periodos de retorno menores.

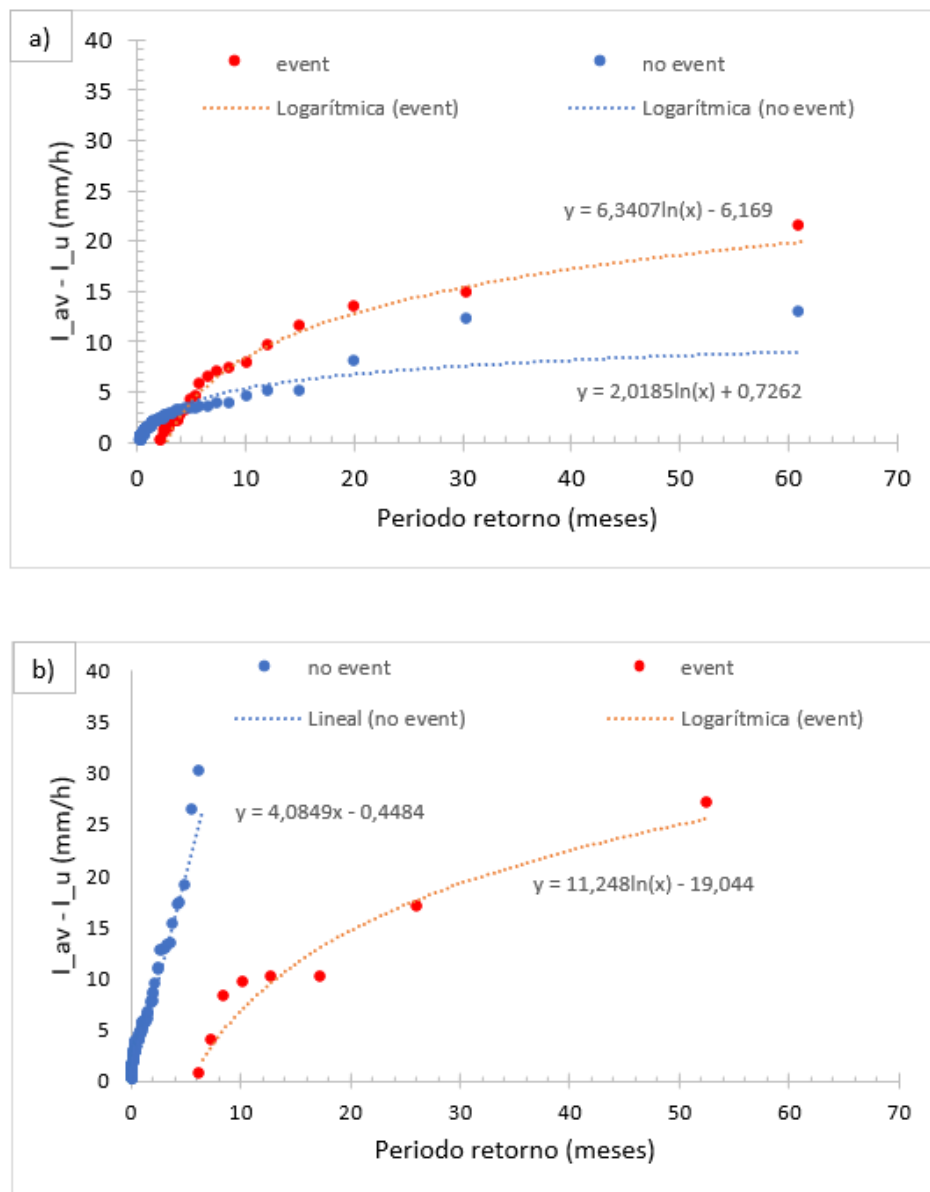


Figura 29. Magnitud lluvias que superan el umbral vs Período de retorno. Método Dtot. a) Lluvias previas al 13/08/2014. b) Lluvias posteriores al 13/08/2014.

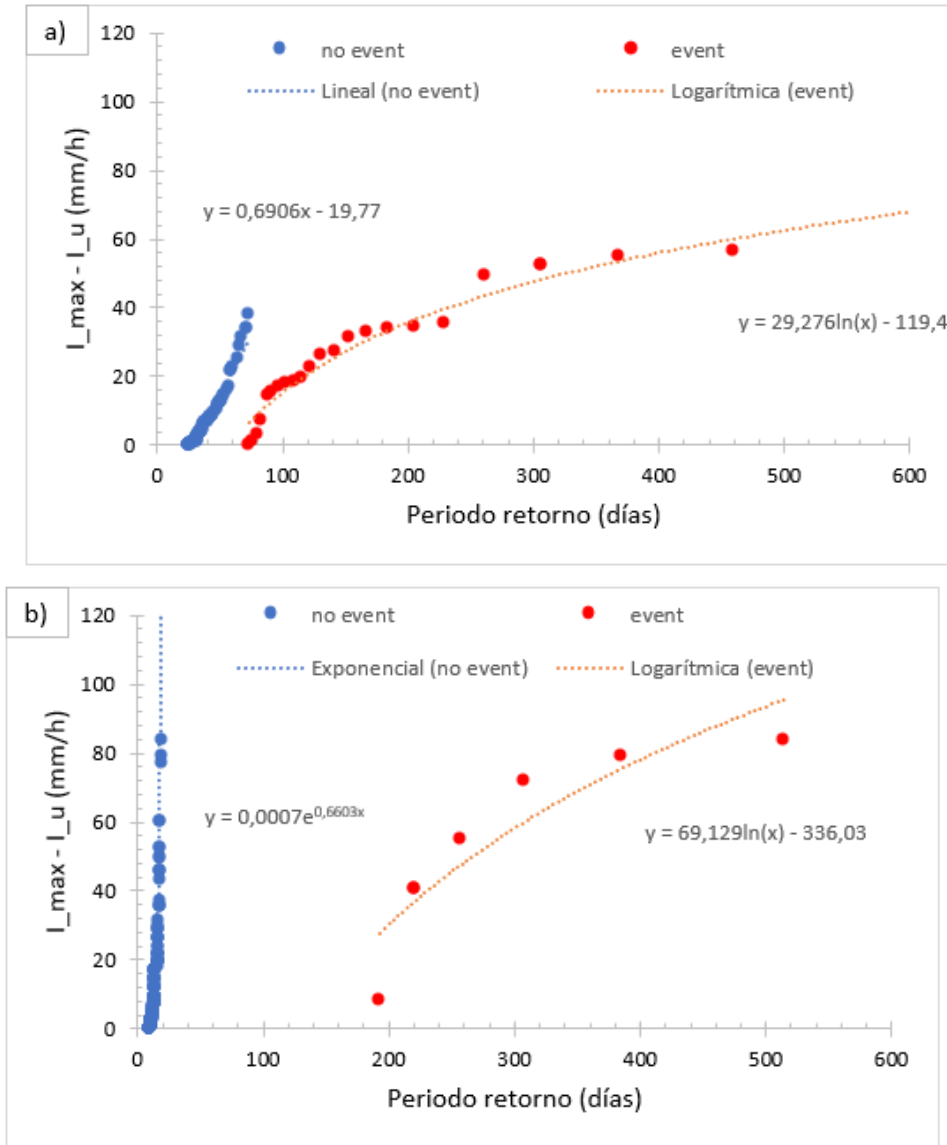


Figura 30. Magnitud lluvias que superan el umbral vs Período de retorno. Método Dfl. a) Lluvias previas al 13/08/2014. b) Lluvias posteriores al 13/08/2014

Para finalizar el estudio se analizaron los volúmenes movilizados por los flujos torrenciales ocurridos antes y después del 13 de agosto de 2014 (Figura 31). Este análisis evidencia una disminución significativa en el volumen movilizado en eventos ocurridos después del 13 de agosto de 2014, esto comprueba que el muro de bloques está actuando como una presa, y los flujos ocurridos después de esta fecha pueden ser originados solo por erosión del material en la zona del canal.

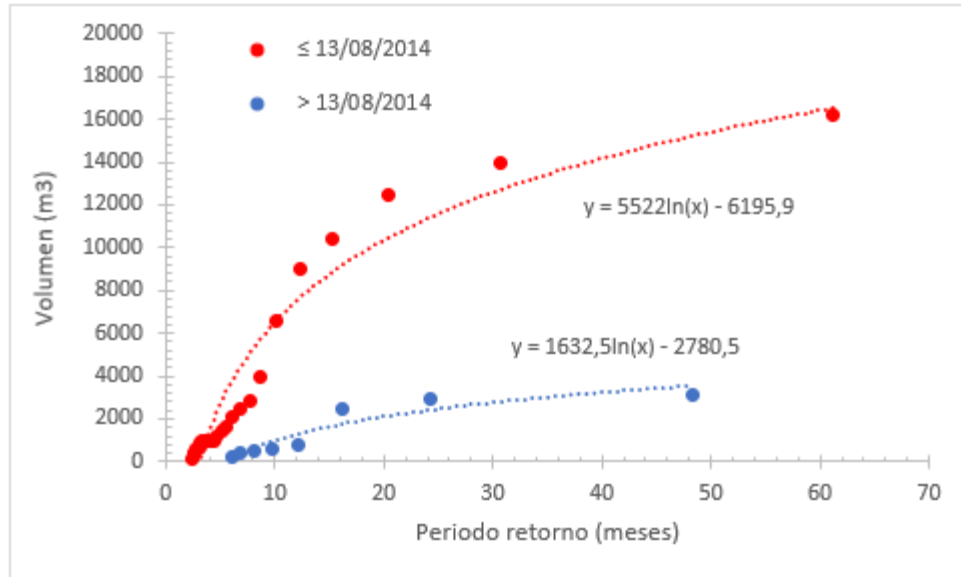


Figura 31. Volumen movilizado vs Periodo de retorno.

## 6. CONCLUSIONES

Se definieron nuevos umbrales de lluvia variando el tiempo entre episodios de lluvias, usando los métodos de la duración total y de duración flotante, los resultados evidenciaron que existe una gran influencia en los resultados de acuerdo con el método que se use. El método de la duración total presentó intensidades máximas de 36 mm/h y periodos de retorno promedio de 1 mes, mientras que las intensidades obtenidas por el método de la duración flotante presentaron un máximo de 124 mm/h y periodos de retorno promedio de 3 meses.

Se comprobó que el tiempo entre episodios de lluvia ( $T_{rd}$ ) influye directamente en el desempeño de umbrales de lluvia, pues se observó que mientras este tiempo aumentaba, la cantidad de falsas alarmas también aumentaba. Siendo el umbral definido con un  $T_{rd}$  de 1 hora el que menor porcentaje de falsas alarmas presentó, 11% para el caso del método de la duración total y 9% para el método de la duración flotante.

Se observó que cuando se tienen registros continuos de alta frecuencia, el método de duración flotante presenta una ventaja de cara a la implementación de sistemas de alerta temprana basados en umbrales de lluvia, pues sería capaz de procesar y analizar la lluvia en tiempo real, brindando así, un mayor tiempo de reacción frente a posibles desencadenamientos de flujos torrenciales.

La presencia de tantas falsas alarmas en los umbrales propuestos evidencia que para que se produzca un evento, la superación del umbral es condición necesaria, pero no suficiente, sino que entran en juego otros factores como: la topografía, disponibilidad de sedimentos y características propias del suelo.

El análisis de frecuencia de las lluvias que desencadenaron flujos torrenciales permitió comprobar que lluvias con duraciones entre 1 y 2 horas desencadenaron un total de 12 flujos torrenciales, lo que equivale al 36% del total, siendo las que mayor frecuencia presentaron. Mientras que lluvias con duraciones mayores a 5 horas solo desencadenaron un total de 4 flujos torrenciales

Se identificó un cambio en el comportamiento de las lluvias que superan el umbral luego de que se desencadenara la corriente de derrubios del 13 de agosto del 2014, en especial las lluvias que superan el umbral y no desencadenan deslizamientos, las cuales se presentan con una mayor frecuencia. También se observó que después de esa fecha los flujos torrenciales se dan con una menor frecuencia. Este cambio en el comportamiento puede deberse a que en esta fecha la corriente de derrubios formó un muro de bloques en el pie del área fuente que actúa como una presa de sedimentos dificultando la formación de nuevos flujos torrenciales.

Se desarrollo un algoritmo usando el software MATLAB, el cual mejoró y facilitó significativamente el análisis y procesamiento de datos.



## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abancó, C, Paretas-Martínez, J., Falgàs, E., Pérez-Arcas, J., & Hürlimann, M. (2015). *Wireless landslide monitoring — triggering factors and dynamic behaviour*. Ninth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2015 9-11 September, Sydney, 781–788.
- Abancó, Clàudia, Hürlimann, M., Moya, J., & Berenguer, M. (2016). *Critical rainfall conditions for the initiation of torrential flows. Results from the Rebaixader catchment (Central Pyrenees)*. Journal of Hydrology, 541, 218–229.
- Badoux, A., Graf, C., Rhyner, J., Kuntner, R., & McArdeell, B. W. (2008). *A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: Design and performance*. Natural Hazards, 49(3), 517–539.
- Batlle Carrerras, M. (2011). *Llindars de pluja desencadenants de corrents d'arrossegalls. Aplicació al barranc de El Rebaixader*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Caine, N. (1980). *The Rainfall Intensity : Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows*, 62(1), 23–27.
- Fawcett, T. (2005). *An introduction to ROC analysis*. Pattern Recognition Letters, 27(8), 861–874.
- García González, R. (2004). *Magnitud y frecuencia de las corrientes de derrubios en el barranco del Toro, Serra de Port del Compte*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). *Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides*. Catacan Lepas, 48.
- Hürlimann, M., Abancó, C., Moya, J., & Vilajosana, I. (2014). *Results and experiences gathered at the Rebaixader debris-flow monitoring site, Central Pyrenees, Spain*. Landslides, 11(6), 939–953.
- Hürlimann, Marcel, Oorthuis, R., Abancó, C., Carleo, L., & Moya, J. (2019). *Monitoring of rainfall and infiltration at the Rebaixader catchment (Central Pyrenees)*. 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation.

- Melillo, M., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2014). *An Algorithm for the objective reconstruction of rainfall events responsible for landslides*. *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools: Volume 1: Fundamentals, Mapping and Monitoring*, (August 2013), 433–447.
- Pierson, T., Jakob, M., & Hungr, O. (1970). *Hyperconcentrated flow — transitional process between water flow and debris flow*.

## Anexo A

A continuación, se presenta el algoritmo desarrollado en el software MATLAB para el procesamiento y análisis de datos.

```

clc
clear all
var=xlsread('C:\Users\vicen\Documents\MATLAB\TFM\data_continua.xlsx','serie_c
ontinua','D2:D818048');
[~,y,~]=xlsread('C:\Users\vicen\Documents\MATLAB\TFM\data_continua.xlsx','ser
ie_continua','B2:B818048');
[~,z,~]=xlsread('C:\Users\vicen\Documents\MATLAB\TFM\data_continua.xlsx','ser
ie_continua','G2:G818048');
[~,ty,~]=xlsread('C:\Users\vicen\Documents\MATLAB\TFM\data_continua.xlsx','se
rie_continua','F2:F818048');
a = length(var);

                                % Inputs %

d=12; % número de pasos para definir la duración (pasos cada 5 minutos,
12pasos=1hora)
% I_umbral = alfa*D^beta
alfa_T= 4.03; %Coeficiente para definir la intensidad del umbral Total
beta_T= -0.478; %Coeficiente para definir la intensidad del umbral Total
alfa_fl= 7.06; %Coeficiente para definir la intensidad del umbral flotante
beta_fl= -0.348; %Coeficiente para definir la intensidad del umbral flotante
d_fl=[1; 2; 3; 6; 12; 18; 24; 36; 48; 60; 72; 96]; %Duraciones flotantes (1
paso = 5 min)

                                %Variables definidas%

s=0; %variable para la suma de la cantidad de lluvia
c_zero=0; % cuenta los ceros
rain=[]; % vector almacena valor de lluvia
inicio=[]; %vector que almacena la fila de inicio de cada evento
fin=[]; %vector que almacena la fila de fin de cada evento
fe=[]; % almacena las fechas de inicio de cada lluvia
evento=[]; %almacena el registro de evento o no evento
event_type=[]; %Almacena el tipo de evento
fi=0; % fila inicial para la suma de un episodio de lluvia
ff=0; % fila final para la suma de un episodio de lluvia
w=length(d_fl);
Imax_5=[]; %Almacena las intensidades max en 5min de cada episodio
aux1=[]; %Almacena las sumatorias de cada evento para luego encontrar el max
Imax_p=[]; %Almacena las intensidades max de cada episodio para cada duración
M_Imax_p=[]; %Concatena las intensidades máx. de todas las duraciones
flotantes
M_d_fl=[]; %Almacena las duraciones en horas
M_dfl_completa=[]; % Almacena la matriz de duración flotante completa
M_D_fl_max=[]; % Contiene las duraciones flotantes correspondientes a las
máximas intensidades flotantes
V_dif_max=[]; % Contiene la diferencia máxima entre la intensidad de la
lluvia y la del umbral
indx_dif_max=[]; % Contiene la posición de la diferencia máxima
M_I_fl_max=[]; % Contiene la intensidad flotante correspondiente a la máxima
diferencia

```

```

        % Calcula los episodios de lluvia%

for i=1:a
    if (var(i,1) > 0)
        if s==0
            fi=i;
        end
        s=s+var(i,1);
        c_zero=0;
    else
        c_zero=c_zero+1;
        if c_zero==d
            ff=i;
            rain=[rain;s];
            inicio=[inicio;fi];
            fin=[fin;(ff-d)];
            fe=[fe;y(fi,1)];
            evento=[evento;z(fi,1)];
            event_type=[event_type;ty(fi,1)];
            s=0;
        end
    end
end

duracion=5+(fin-inicio).*5; %Determina la duración de cada evento
duracion_h= duracion./60;
fecha=datetime(fe, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy');
intensidad_media= rain./duracion_h;
evento= categorical(evento);
event_type= categorical(event_type);
Umb_T= alfa_T.*duracion_h.^(beta_T);
T=table(fecha, rain, duracion, duracion_h, evento, event_type,
intensidad_media, Umb_T);
T.Properties.VariableUnits= {' ' 'mm' 'min' 'horas' ' ' ' ' 'mm/h' 'mm/h'};

    % Calcula la intensidad flotante máxima para cada duración flotante

for r=1:w %Controla el paso de cada duración flotante
    q=length(inicio);
    Imax_p=[];
    p=d_fl(r,1);
    for k=1:q
        %Controla el paso de cada episodio de lluvia
        j= inicio(k,1); %Posición de inicio de un episodio de lluvia
        l= fin(k,1); %Posición de fin de un episodio de lluvia
        if p==1
            %Condición para determinar la lluvia max en 5min
            max_5=max(var(j:1,1));
            aux=max_5*60/5; %Convierte a intensidad en unidades mm/h
            Imax_5=[Imax_5; aux];
        else
            aux1=[];
            if (l-j)>= p-1 %Si la lluvia tiene una duración menor al tiempo
analizado I=0
                for m=j:(l-(p-1)) %Controla las filas de cada episodio para
no pasar el fin del episodio
                    sum=var(m,1);

```

```

        for n=1:(p-1) %Controla la sumatoria de cada rango de
duración
            sum=sum+var(m+n,1);
            end
            aux1=[aux1; sum];
        end
        aux3= max(aux1);
        aux2= aux3*12/p;
    else
        aux2=0;
    end
    end
    Imax_p=[Imax_p; aux2];
end
end
V_d_fl=repmat(p*5/60, q, 1);
M_d_fl=[M_d_fl V_d_fl];
M_Imax_p=[M_Imax_p Imax_p];
end

M_Imax_fl=[Imax_5 M_Imax_p M_d_fl]; %Concatena las intensidades de todas las
duraciones flotantes
duracion_fl=(d_fl./12);
Umb_fl= alfa_fl.*duracion_fl.^(beta_fl); %Vector umbral flotante

% Calcula la diferencia max entre la intensidad de la lluvia y el umbral

for n=1:length(M_Imax_fl)
    [dif_max,indice]= max(M_Imax_fl(n,1:12)-Umb_fl'); %Obtiene la dif max y
el la posicion de esa diferencia
    I_fl_max= M_Imax_fl(n,indice); %Obtiene la intensidad correspondiente a
la dif max en fila n
    if I_fl_max==0 % Condicion para evitar obtener ceros en la intensidad
        [I_fl_max, indice]= max(M_Imax_fl(n,1:12)); %Recalcula la intens
correspondiente a la dif max en fila n
    end
    M_I_fl_max=[M_I_fl_max I_fl_max]; %Vector almacena la intensidad de
Lluvia correspondiente a la dif max
    D_fl_max= M_d_fl(n,indice); %Obtiene la duracion para la dif max en la
fila n
    M_D_fl_max=[M_D_fl_max D_fl_max]; %Vector almacena la duracion
correspondiente a la diferencia max
    V_dif_max=[V_dif_max dif_max]; %Vector almacena la diferencia maxima
Lluvia-Umbra
end

M_dfl_completa= [M_Imax_fl V_dif_max' M_I_fl_max' M_D_fl_max'];
T_fl=array2table(M_dfl_completa);
T_fl.Properties.VariableNames= {'I_fl_5' 'I_fl_10' 'I_fl_15' 'I_fl_30'
'I_fl_60' 'I_fl_90' 'I_fl_120'...
'I_fl_180' 'I_fl_240' 'I_fl_300' 'I_fl_360' 'I_fl_480' 'd5' 'd10' 'd15' 'd30'
'd60' 'd90' 'd120' 'd180'...
'd240' 'd300' 'd360' 'd480' 'Dif_max' 'Int_fl_max' 'Duracion_fl'};
T_fl.Properties.VariableUnits(1:w)= {'mm/h'};
T_fl.Properties.VariableUnits(w+1:2*w)= {'min'};
T_Total=[T T_fl];
Ev= T_Total(T_Total.evento=='event',:); %Tabla con datos solo de eventos

```

```

NE= T_Total(T_Total.evento=='no event',:); %Tabla con datos solo de no
eventos
DF= T_Total(T_Total.event_type=='dflood',:); %Tabla con datos solo de dflood
DFW= T_Total(T_Total.event_type=='dflow',:); %Tabla con datos solo de dflow
M_ev=table2dataset(Ev);
M_NE= table2dataset(NE);
M_DF= table2dataset(DF);
M_DFW= table2dataset(DFW);
U_Dt_old= 11.*duracion_h.^(-0.74);
U_Dt_caine= 14.82.*duracion_h.^(-0.39);
U_Dt_Guzzetti= 2.2.*duracion_h.^(-0.44);
U_Dt_Deganutti= 15.*duracion_h.^(-0.70);
U_Dt_Badoux= 5.4.*duracion_h.^(-0.79);
U_Dfl_old= (5.49).*duracion_fl.^(-0.75);
U_Dfl_caine= 14.82.*duracion_fl.^(-0.39);
U_Dfl_Guzzetti= 2.2.*duracion_fl.^(-0.44);
U_Dfl_Badoux= 5.4.*duracion_fl.^(-0.79);

%Grafico Intensidad Total%

figure(1);
loglog(NE.duracion_h, NE.intensidad_media, 'k+', DFW.duracion_h,
DFW.intensidad_media, 'gd', ...
DF.duracion_h, DF.intensidad_media, 'r^');
title('Intensidad media vs Duración total');
xlabel('Duracion (h)');
ylabel('Intensidad media (mm/h)');
xlim([0.05 100]);
ylim([0 100]);
hold on
loglog(duracion_h, Umb_T);
loglog(duracion_h, U_Dt_old, 'r');
loglog(duracion_h, U_Dt_caine, 'y');
% loglog(duracion_h, U_Dt_Deganutti, 'c'); 'Deganutti (2000)'
loglog(duracion_h, U_Dt_Badoux, 'm');
legend('No event', 'Dflow', 'Dflood', 'Umbral propuesto', 'Hürlimann et
al.(2018)', ...
'Caine (1980)', 'Badoux(2008)');
hold off

%Grafico Intensidades flotantes%

figure(2);
pl1=loglog(M_NE(:,21:32), M_NE(:,9:20), 'k+');
hold on
pl2=loglog(M_DFW(:,21:32), M_DFW(:,9:20), 'gd');
pl3=loglog(M_DF(:,21:32), M_DF(:,9:20), 'r^');
pl4=loglog(duracion_fl, Umb_fl);
pl5=loglog(duracion_fl, U_Dfl_old);
pl6=loglog(duracion_fl, U_Dfl_caine);
pl7=loglog(duracion_fl, U_Dfl_Guzzetti);
pl8=loglog(duracion_fl, U_Dfl_Badoux);
hold off
legend([pl1(1), pl2(1), pl3(1), pl4(1), pl5(1), pl6(1), pl8(1)], 'No event',
'DFlow', ...

```

```

'DFlood', 'Umbral propuesto', 'Abancó et al.(2016)', 'Caine (1980)',
'Badoux(2008)' );
title('Intensidad flotante vs Duración flotante');
xlabel('Duracion (h)');
ylabel('Intensidad flotante máxima (mm/h)');
xlim([0.04 12]);
ylim([0.1 max(Imax_5)+50]);

%Obtención de episodios que superan el umbral Dfloat%

Dif_Dt_Um=intensidad_media-Umb_T; %Diferencia intensidad media - Umbral
ESUT=Dif_Dt_Um(Dif_Dt_Um>=0); %Episodios de lluvia que superan el Umbral Dt
Ind_D_T=find(intensidad_media-Umb_T>=0); %Posición de los episodios que
superan el Umbral DT
Fecha_ESU=fecha(Ind_D_T,1); %Obtiene la fecha correspondiente a cada episodio
que supera el umbral
Event_ESU=event_type(Ind_D_T,1); %Obtiene el tipo de evento correspondiente a
cada episodio que supera el umbral
Duracion_ESU=duracion_h(Ind_D_T,1); %Obtiene la duración correspondiente a
cada episodio que supera el umbral
Event1_ESU=evento(Ind_D_T,1); %Obtiene si hay evento o no correspondiente a
cada episodio que supera el umbral
T_ESU=table(Fecha_ESU, Duracion_ESU, Event1_ESU, Event_ESU, ESUT);
T_ESU.Properties.VariableNames= {'Fecha' 'Duracion_h' 'Event1' 'Event_type'
'Dif_Lluv_Umb_T'};

%Obtención de episodios que superan el umbral Dfloat%

Dif_max_DFL= V_dif_max'; %Obtiene la dif máxima en forma de vector vertical
ESU_FL= Dif_max_DFL(Dif_max_DFL>=0); %Episodios de lluvia que superan el
Umbral Dflotante
Ind_D_FL= find(Dif_max_DFL>=0); %Posición de los episodios que superan el
Umbral Dflotante
Fecha_ESU_FL= fecha(Ind_D_FL,1); %Obtiene la fecha correspondiente a cada
episodio que supera el umbral
Event_ESU_FL=event_type(Ind_D_FL,1); %Obtiene el tipo de evento
correspondiente a cada episodio que supera el umbral
Duracion_ESU_FL=duracion_h(Ind_D_FL,1); %Obtiene la duración correspondiente
a cada episodio que supera el umbral
Event1_ESU_FL=evento(Ind_D_FL,1); %Obtiene si hay evento o no correspondiente
a cada episodio que supera el umbral
T_EST_FL= table(Fecha_ESU_FL, Duracion_ESU_FL, Event1_ESU_FL, Event_ESU_FL,
ESU_FL);
T_EST_FL.Properties.VariableNames= { 'Fecha' 'Duracion_h' 'Event1'
'Event_type' 'Dif_Lluv_Umb_FL'};
writetable(T_Total, 'Umbral_1h.xlsx', 'sheet', 1);
writematrix(Umb_fl, 'Umbral_1h.xlsx', 'sheet', 1, 'Range', 'AK2')
writetable(Ev, 'Umbral_1h.xlsx', 'sheet', 2);
writetable(NE, 'Umbral_1h.xlsx', 'sheet', 3);
writetable(T_ESU, 'Umbral_1h.xlsx', 'sheet', 6);
writetable(T_EST_FL, 'Umbral_1h.xlsx', 'sheet', 7);

%Grafico Distribución cronológica de lluvias que superan el umbral%

bar(Fecha_ESU, ESUT);
title('Distribución cronológica de lluvias que superan el umbral Dtot');

```

```

ylabel('Diferencia Lluvia-Umbra1 (mm/h)');
bar(Fecha_ESU_FL, ESU_FL);
title('Distribución cronológica de lluvias que superan el umbral Dfl');
ylabel('Diferencia Lluvia-Umbra1 (mm/h)');

    % Ejemplo para definir el umbral flotante

for h=3:4
    pl1=loglog(M_DFW(h,21:32), M_DFW(h,9:20), '-gd');
    hold on
    pl2=loglog( M_DF(h,21:32), M_DF(h,9:20), '-r^');
    pl3=loglog(duracion_fl, Umb_fl, 'b');
    pl4=loglog(M_DF(h,35), M_DF(h,34), '-r^', 'MarkerSize', 10);
    pl5=loglog(M_DFW(h,35), M_DFW(h,34), '-gd', 'MarkerSize', 10);
    legend([pl1(1), pl2(1), pl3(1)], 'DFlow', 'DFlood', 'Umbral Preliminar',
'Location', 'northeast');
    title('Intensidad flotante vs Duración flotante');
    xlabel('Duracion (h)');
    ylabel('Intensidad flotante máxima (mm/h)');
end

```



## Anexo B

En este anexo se presentan las gráficas correspondientes a los umbrales de lluvia definidos para los tiempos entre episodios de: 2, 3, 4, 5, 6, 12 y 24 horas.

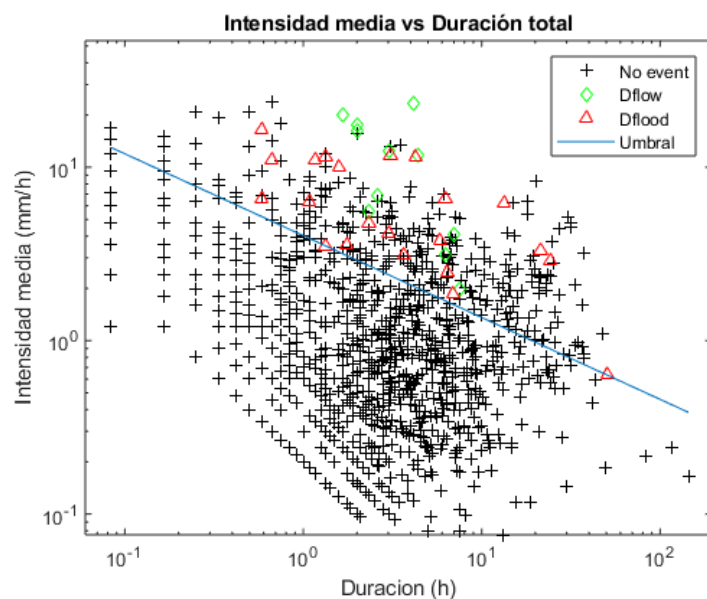


Figura 32. Umbral definido mediante el método Dtot,  $T_{rd}=2$  horas.

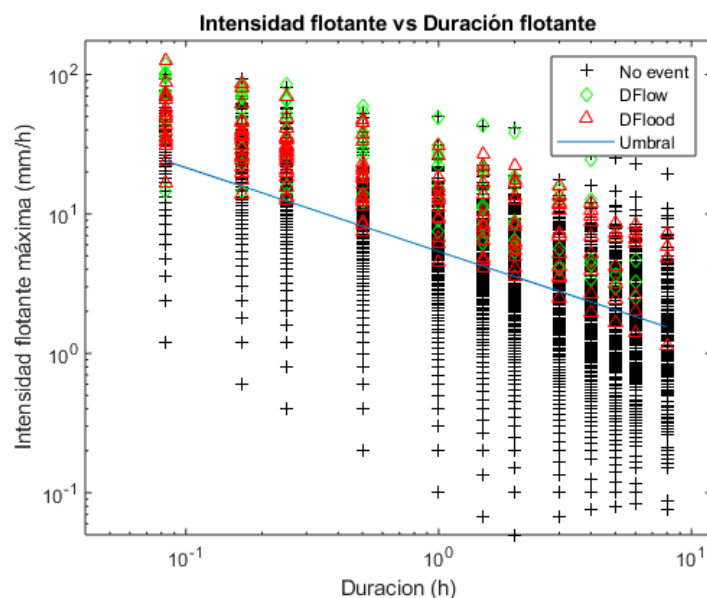


Figura 33. Umbral definido mediante el método Dfl,  $T_{rd}=2$  horas.

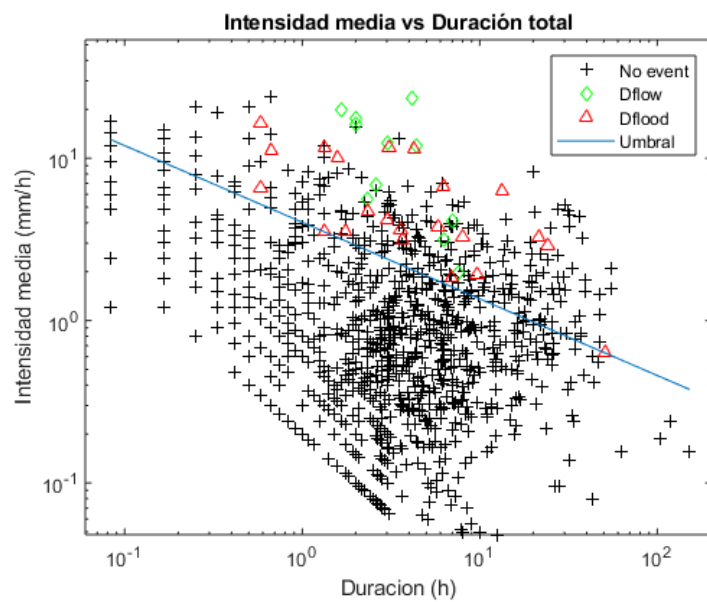


Figura 34. Umbral definido mediante el método Dt<sub>tot</sub>, T<sub>rd</sub>=3 horas.

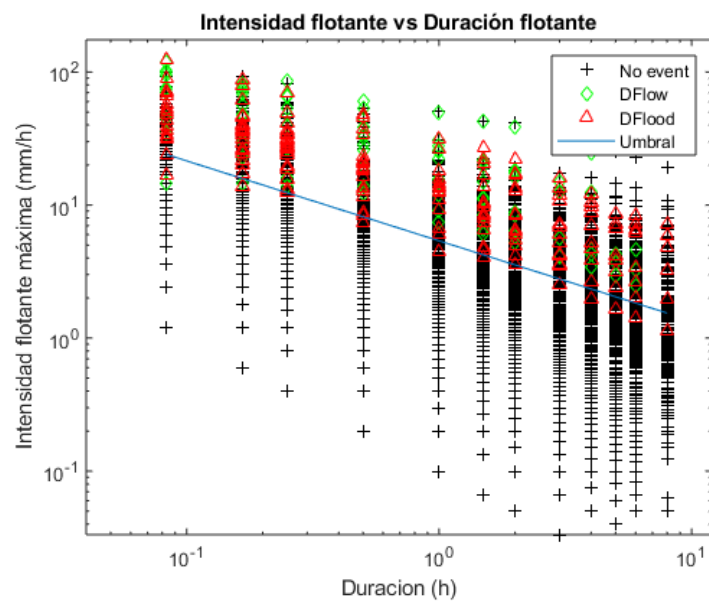


Figura 35. Umbral definido mediante el método D<sub>fl</sub>, T<sub>rd</sub>=3 horas.

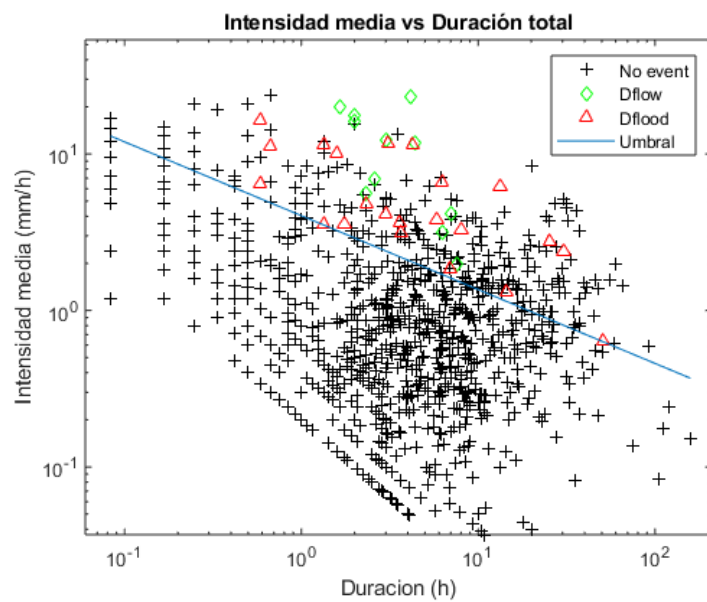


Figura 36. Umbral definido mediante el método Dt<sub>tot</sub>, T<sub>rd</sub>=4 horas.

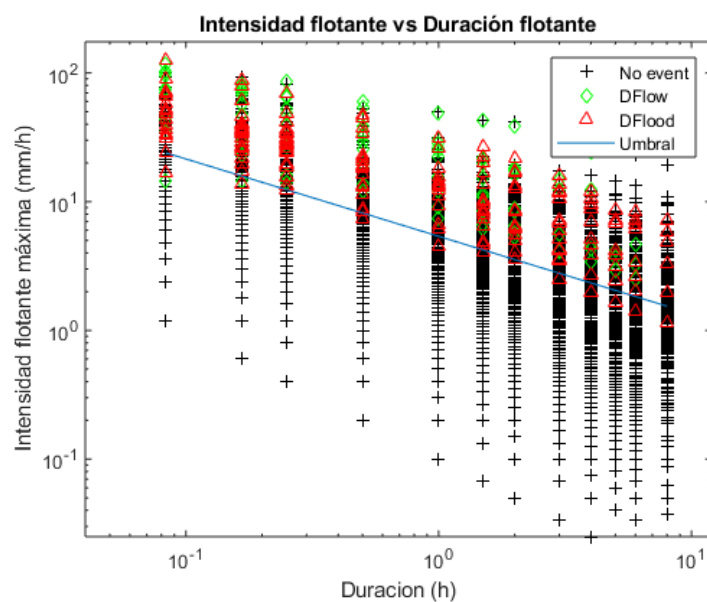


Figura 37. Umbral definido mediante el método Df<sub>l</sub>, T<sub>rd</sub>=4 horas.

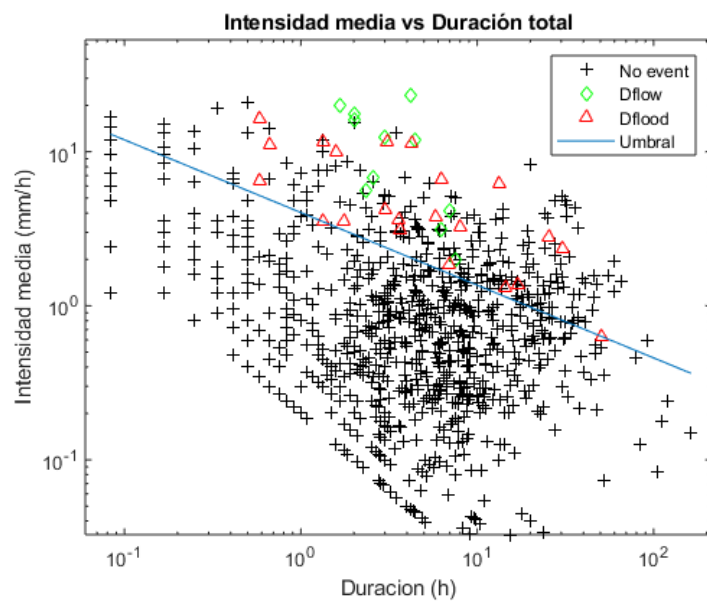


Figura 38. Umbral definido mediante el método Dt<sub>tot</sub>, T<sub>rd</sub>=5 horas.

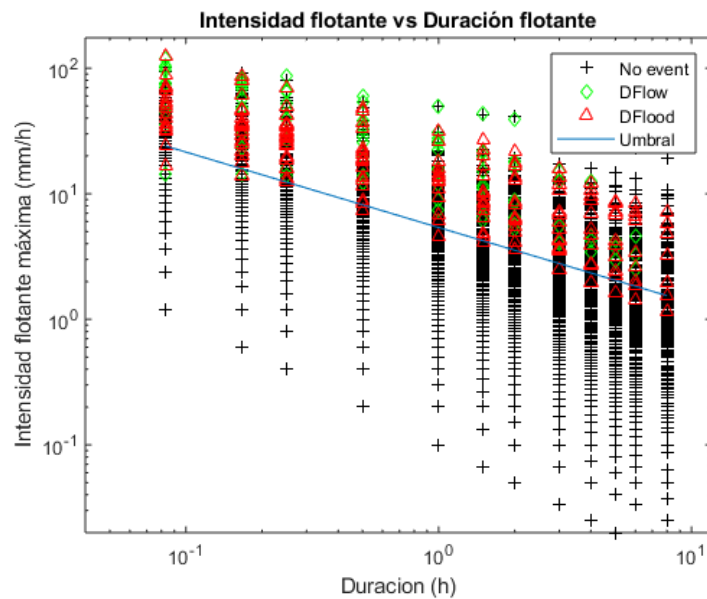


Figura 39. Umbral definido mediante el método Df<sub>f</sub>, T<sub>rd</sub>=5 horas.

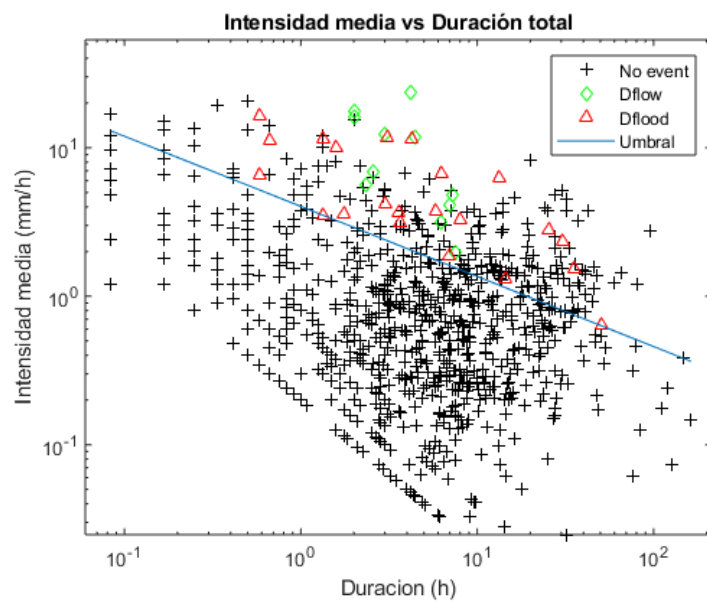


Figura 40. Umbral definido mediante el método Dtot,  $T_{rd}=6$  horas.

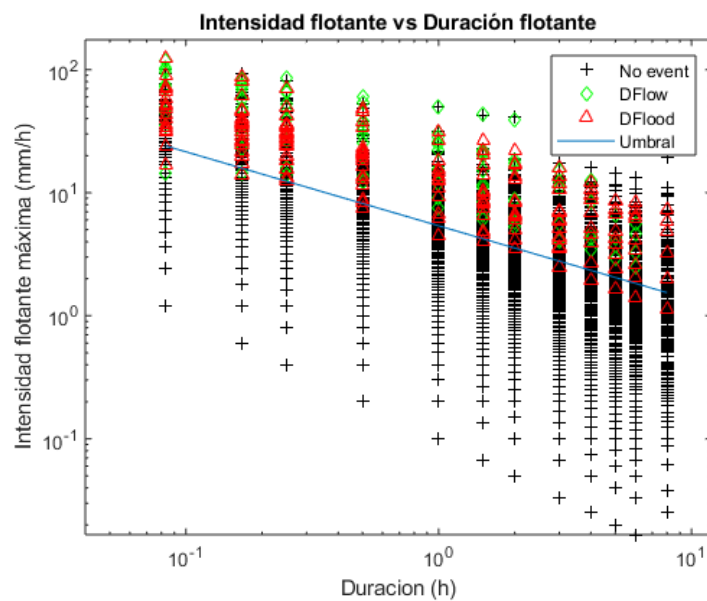


Figura 41. Umbral definido mediante el método Dfl,  $T_{rd}=6$  horas.

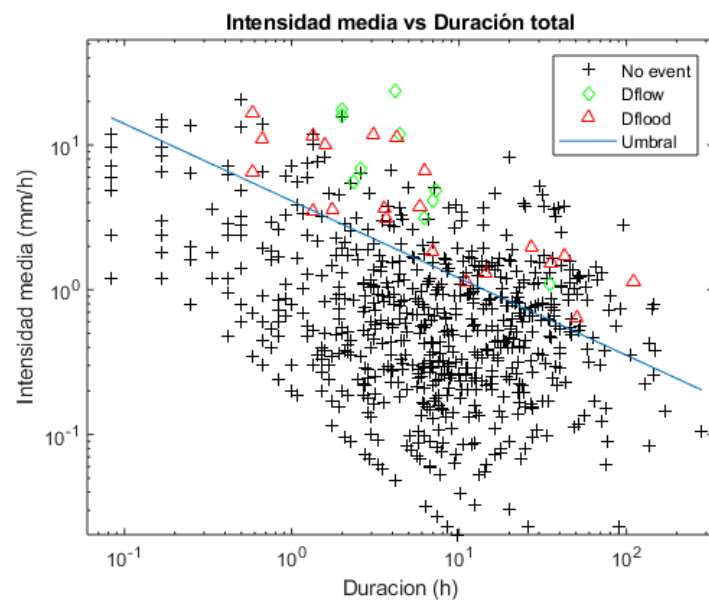


Figura 42. Umbral definido mediante el método  $D_{tot}$ ,  $T_{rd}= 12$  horas.

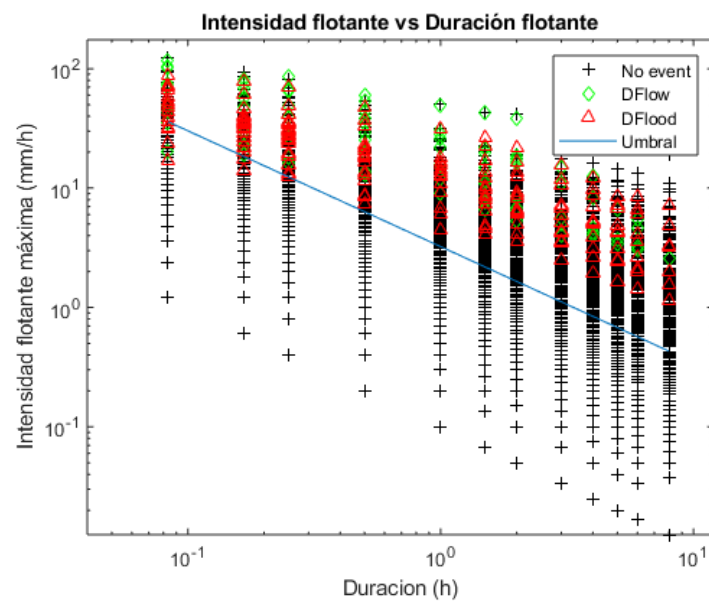


Figura 43. Umbral definido mediante el método  $D_{fl}$ ,  $T_{rd}= 12$  horas.

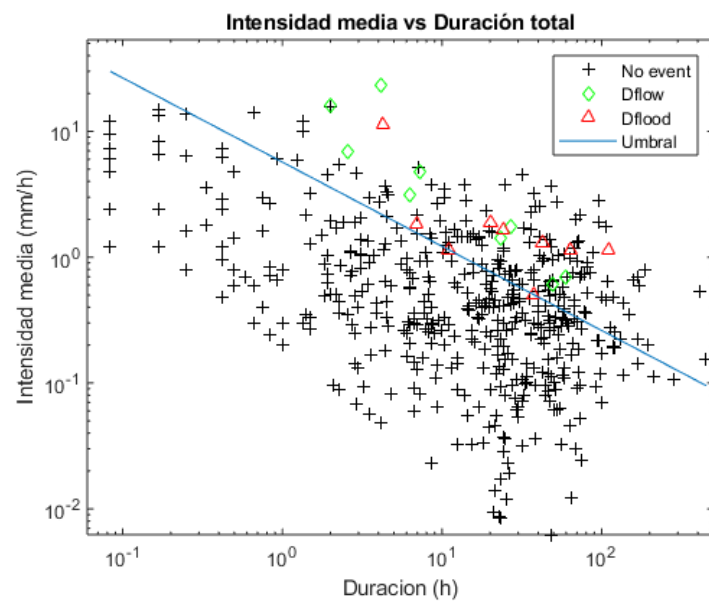


Figura 44. Umbral definido mediante el método  $D_{tot}$ ,  $T_{rd}=24$  horas.

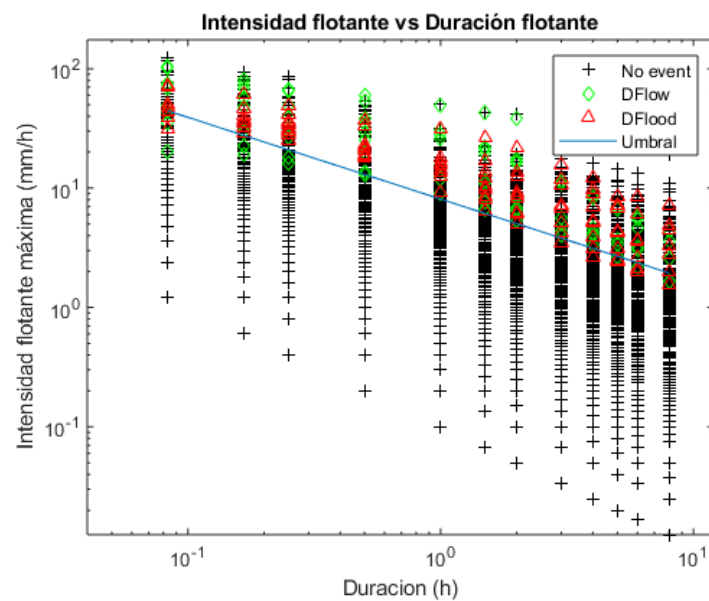


Figura 45. Umbral definido mediante el método  $D_{fl}$ ,  $T_{rd}=24$  horas.